数控加工编程

技巧与禁忌

陈为国 陈昊◎编著

结合加工编程与数控机床操作
迅速解决现场实际问题
成就技能高手之路

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数控加工编程技巧与禁忌

陈为国　陈　昊　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书编写的目的是指导具备数控加工编程基础知识的读者进一步提升编程能力。在内容选择上，以FANUC 0i系列数控系统为对象，以应用广泛的数控车削与铣削加工编程技术为主，抛砖引玉地提示出学好数控加工编程必须具备的基本知识与素质，适当增加了提升加工编程技术必备的数控机床操作知识。

本书不仅是从事数控加工编程人员的良师益友，更是刚走出校门不久，并有志于从事数控加工编程人员的好帮手。同时，本书可作为各级各类相关学校与培训机构的辅助教材及其学生的学习参考书。

图书在版编目（CIP）数据

数控加工编程技巧与禁忌/陈为国，陈昊编著．—北京：机械工业出版社，2014.9

ISBN 978-7-111-47591-0

Ⅰ.①数…　Ⅱ.①陈…②陈…　Ⅲ.①数控机床—程序设计　Ⅳ.①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第180772号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：周国萍　责任编辑：周国萍　刘本明
版式设计：赵颖喆　责任校对：肖　琳
封面设计：马精明　责任印制：李　洋
三河市宏达印刷有限公司印刷
2014年11月第1版第1次印刷
184mm×260mm·17.75印张·427千字
0001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-47591-0
定价：59.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http：//www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http：//www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http：//weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**
策划编辑电话：（010）88379733	

前　言

数控加工技术自20世纪50年代出现以来，以其实用性与先进性的优势迅速被实际生产所接受。特别是计算机技术的出现与发展，为数控技术走向实际应用提供了技术保证，并使其成为实际生产中广泛采用的先进制造技术之一。

在国内，20世纪90年代以后，数控加工技术得到了迅速普及与推广，多数工科院校的相关专业开始开设数控加工技术类课程。多数机械制造企业，在技术改造、设备更新方面，注重数控机床的选择与应用。同时，在数控机床应用方面，各企业在自身培养数控技术人才的同时，大量吸收了各级各类学校的毕业生作为应用数控技术的人才队伍。经过20多年的发展，数控加工技术已经成为从事机械制造专业技术人才的必备知识之一。

数控加工技术的快速普及与发展，需要大量的数控加工技术人才。数控加工技术作为一门应用技术，其人才队伍主要分为三大类：第一类是数控加工编程技术人才。这类人员要求具备机械制造技术理论、数控技术基础理论与数控加工编程技术，一般来自高校机械制造专业毕业的学生。第二类是数控机床操作人才。这类人员要求具有熟练的机床操作技能，最好是从事过相关普通机床操作，有一定机床操作基础，然后经过专业的数控机床操作培训的人员。当然，各级高职院校相关专业毕业生入厂后的强化训练，也是一种快速培养数控机床操作技能人才的好方法。第三类人才是数控机床维护与修理人员。这类人员必须精通机械设备结构与维修技术，掌握一定的机电技术与计算机技术，经过专门数控机床维修培训。由于数控系统厂家技术保密等原因，高级的数控机床维护修理人员的市场缺口很大。本书主要针对第一类从事数控加工编程技术，且具备一定数控编程基础，希望进一步提高数控加工编程技术的人员。应当注意的是，虽然各类人才的专业分工有所差异，但他们都必须对这些技术有所了解。就数控加工编程技术而言，数控加工编程中很多知识涉及数控机床操作知识，如机床坐标系的建立，手动与自动返回机床参考点指令的作用与机床动作、程序的暂停与选择暂停指令、程序段跳过功能等，以及数控加工程序的首件试切涉及的机床锁住运行、空运行、单段运行等。同样，数控系统相关参数的设置、数控机床出现的一些小故障等，数控编程人员也应有所了解。

当前，大部分的数控加工编程技术人员均经过各级学校专业学习，已具备初步的数控加工编程技术知识。这类人员工作一段时间后，均会产生进一步提升自身编程能力的想法与动力。国内关于数控加工技术的书籍虽然较多，但大部分以普及数控加工编程知识为目标。基于这个原因，本书以编程技巧与禁忌的形式编排数控加工编程知识，希望对提升数控加工编程能力有所帮助。

全书分为4章编写。第1章旨在通过基本概念、基本知识、切削参数与刀具知识的学习，提示有志于从事数控加工编程的人员在提升自身数控加工知识修养方面应该注意的事项。第2、3章是本书的主要内容。笔者根据多年的工作经验，根据数控车床编程与数控铣床编程特点，介绍了数控车床与数控铣床编程技巧与禁忌。由于读者的定位为具备初步数控加工编程基础的人员，因此，可能出现少量加工指令未作介绍而直接应用的情况，必要时读

者可参阅相关图书或厂家的编程手册。第 4 章是基于数控加工编程人员必须具备必要的数控机床操作知识的要求而编写的，内容包括数控机床的基本操作、数控加工程序调试技巧、数控加工的程序传输与在线加工、数控系统参数设置等。

在本书的编写过程中得到了南昌航空大学科技处、教务处、航空制造工程学院、工程训练中心，以及中航工业江西洪都航空工业集团有限公司等领导的关心和支持，得到了航空制造工程学院数控技术实验室和工程训练中心数控技术教学部等部门相关老师的指导和帮助，在此表示衷心的感谢！

本书虽经反复推敲与校对，但因时间仓促，加之编者水平所限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，并可通过书信或电子邮件提出宝贵意见。联系方式如下：

通信地址：江西省南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学航空制造工程学院

邮政编码：330063

电子邮件：wgchen0113@126.com

陈为国

2014 年 8 月于南昌航空大学

目　　录

前言
第1章　引言 …… 1
1.1　数控加工概述 …… 1
1.2　数控编程基础知识 …… 3
1.2.1　程序与程序段的结构 …… 3
1.2.2　主、子程序及子程序调用 …… 6
1.2.3　数控加工G指令表阅读时的注意事项 …… 8
1.2.4　基本编程指令分析 …… 9
1.2.5　辅助功能指令M的应用技巧 …… 15
1.3　数控加工刀具和切削参数选择技巧与禁忌 …… 18
1.3.1　刀具结构与选择 …… 18
1.3.2　刀具切削部分的材料与选择 …… 19
1.3.3　数控车床切削部分刀具角度与加工轮廓的关系 …… 20
1.3.4　数控铣削刀具的结构与主要参数选择 …… 23
1.3.5　切削用量的选择技巧 …… 26
1.4　如何学好数控加工编程技术 …… 28
第2章　数控车床加工编程技巧与禁忌 …… 31
2.1　数控车床编程必备基础 …… 31
2.2　主轴速度和进给轴速度控制与应用分析 …… 34
2.2.1　主轴速度控制与应用 …… 34
2.2.2　进给轴速度控制与应用 …… 35
2.3　刀具功能指令T与动作分析 …… 37
2.3.1　刀具功能指令T的格式 …… 37
2.3.2　刀具补偿（偏置） …… 37
2.3.3　刀具偏置的动作分析 …… 38
2.4　数控车床的坐标系及其建立 …… 40
2.4.1　数控车床坐标系的概念 …… 40
2.4.2　机床坐标系与参考点 …… 41
2.4.3　工件坐标系 …… 42
2.4.4　数控车床工件坐标系的建立方法 …… 43
2.5　固定循环指令 …… 51
2.5.1　简单循环指令G90/G94编程技巧 …… 51
2.5.2　复合循环指令G71～G73与G70编程技巧 …… 61
2.5.3　车槽复合循环指令G74/G75编程技巧 …… 72
2.5.4　复合循环指令综合编程示例 …… 77
2.6　螺纹车削加工 …… 80
2.6.1　螺纹特征分析 …… 80
2.6.2　螺纹车削方法分析 …… 81

2.6.3 螺纹加工指令 G32、G92 与 G76 分析 …… 86
2.6.4 多线螺纹的车削技巧 …… 90
2.6.5 调用子程序简化编程 …… 96
2.7 梯形螺纹的车削技巧 …… 101
2.7.1 梯形螺纹基本要素分析 …… 101
2.7.2 梯形螺纹结构与车削特点分析 …… 102
2.7.3 梯形螺纹分层切削法编程 …… 102
2.7.4 梯形螺纹左右切削法编程 …… 104
2.8 变螺距螺纹车削编程 …… 107
2.9 其他编程技巧 …… 107
2.9.1 刀尖圆弧半径补偿使用技巧 …… 107
2.9.2 多刀加工问题与编程技巧 …… 112
2.9.3 加工尺寸的控制技巧 …… 115
2.9.4 切断加工终点坐标的确定技巧与禁忌 …… 117
2.9.5 计算机辅助编程和手工编程的比较与应用技巧 …… 118
第 3 章 数控铣床和加工中心编程技巧与禁忌 …… 123
3.1 数控铣床编程基础 …… 123
3.1.1 数控铣床程序段结构特点 …… 124
3.1.2 主轴速度与进给速度控制 …… 125
3.1.3 数控铣床工件坐标系及其建立 …… 125
3.2 刀具路径的规划技巧 …… 131
3.2.1 起/退刀点的选取技巧与禁忌 …… 132
3.2.2 轴向下刀和提刀技巧与禁忌 …… 134
3.2.3 横向切入和切出技巧与禁忌 …… 140
3.2.4 横向切入和切出方式编程技巧 …… 142
3.2.5 水平分层与垂直分层加工的处理技巧 …… 142
3.2.6 加工路径规划与选择技巧 …… 143
3.2.7 典型加工路径编程技巧与分析 …… 144
3.2.8 整圆编程与螺旋编程及其应用 …… 149
3.3 刀具半径补偿与长度偏置及其应用 …… 152
3.3.1 刀具半径补偿功能与动作分析 …… 152
3.3.2 刀具半径补偿功能应用技巧 …… 159
3.3.3 补偿刀具磨损以及实现轮廓尺寸的精确控制 …… 163
3.3.4 刀具长度偏置功能与动作分析 …… 164
3.3.5 刀具长度偏置指令的应用分析 …… 167
3.4 孔特征加工固定循环指令 …… 171
3.4.1 孔特征与固定循环加工指令的引出 …… 171
3.4.2 FANUC 0i 系统孔特征加工指令分析 …… 176
3.4.3 孔加工固定循环指令与应用注意事项 …… 190
3.4.4 固定循环指令综合应用示例 …… 191
3.5 其他编程技巧 …… 200
3.5.1 四个参考点的说明与设置 …… 200
3.5.2 加工中心的选刀与换刀编程技巧 …… 202

3.5.3　子程序调用简化编程……204
3.5.4　工件坐标系零点偏置的分析与应用……206
3.5.5　附加工件坐标系 G54.1 的概念及应用分析……207
3.5.6　局部坐标系 G52 的概念及应用分析……207
3.6　螺纹数控铣削加工……210
3.6.1　螺纹数控铣削的概念及优点……210
3.6.2　螺纹铣削刀具……211
3.6.3　螺纹铣削方法……212
3.6.4　螺纹铣削程序示例……213
第4章　数控机床操作技巧与禁忌……217
4.1　数控机床操作基础……217
4.1.1　操作面板构成分析……217
4.1.2　机床的手动操作技巧……220
4.1.3　机床报警与排除技巧……224
4.1.4　急停操作与超程处理……226
4.2　程序调试技巧……227
4.2.1　上机床前的程序阅读与检查……227
4.2.2　数控机床上的程序检查与调试……228
4.2.3　程序调试相关功能应用技巧……232
4.3　数控程序的编辑与应用……234
4.3.1　程序的检索、建立与删除……235
4.3.2　程序的输入与编辑……237
4.3.3　其他程序编辑功能……240
4.4　坐标位置显示画面与应用……242
4.4.1　坐标位置显示画面的操作……242
4.4.2　相对坐标位置显示与对刀的关系……243
4.5　偏置显示画面与应用技巧……248
4.5.1　数控车床的偏置显示画面与应用技巧……248
4.5.2　数控铣床的偏置显示画面与应用技巧……253
4.5.3　数控机床的 G54 ~ G59 指令与坐标系设置操作技巧……254
4.6　程序的加工运行与应用技巧……257
4.6.1　机床的存储器运行与显示画面的观察……257
4.6.2　系统参数显示、设定与应用技巧……259
4.6.3　数控程序的传输与应用技巧……262
4.6.4　数控程序的 DNC 加工与应用技巧……266
4.6.5　清屏功能与应用技巧……269
4.7　数控系统的帮助功能构成分析与操作应用……270
4.7.1　帮助系统结构构成分析……270
4.7.2　帮助系统使用的基本操作与注意事项……270
参考文献……274

第1章　引　　言

1.1　数控加工概述

1. 起源与标志

20世纪40年代，美国密歇根州的一家小型飞机工业承包商帕森斯公司（Parsons Corporation）在制造飞机的框架及直升机的转动机翼时，利用数字技术对加工路径进行数据处理，极大地保证了加工精度，这可认为是数控加工技术的起源。而后，该公司与麻省理工学院（MIT）开始共同研究，于1952年试制成功世界上第一台三坐标数控铣床，这是目前公认的数控机床产生的标志。

2. 数控加工技术的内涵

数控加工技术是在传统加工技术的基础上，引入数字控制技术控制机床动作进行加工的技术。因此，数控加工技术包含三个层次的内容：首先是基础知识，包括概念、数控系统的基本原理与实现方法、数控机床的基本构成、基础部件与连接等，这部分内容目前统称为数控技术；其次是数控加工应用技术，包括必须掌握的金属切削原理和刀、夹、量具能力，数控加工惯用的刀具结构，数控加工编程代码与编程技能，这部分内容统称为数控加工编程技术；第三部分包括数控机床的调试与维修技术，调试多用于数控机床生产企业，维修则多指数控机床使用单位的机床维护。

就目前国内数控加工技术的发展看，从事数控加工的人才基本掌握了前两部分内容，而真正掌握数控机床调试与维修的人才显得较为匮乏，究其原因，除了其必须有较宽广的机械、电子与电气控制技术外，国外数控系统厂家的技术壁垒也是重要的原因。

3. 数控加工技术常用术语

（1）NC与CNC　NC是英文Numerical Control的缩写，直译为数控；而CNC是英文Computer Numerical Control的缩写，直译为计算机数控。两者常泛指数控技术。具体而言，NC是数控技术出现初期的定义，一般指早期以硬件逻辑电路构成数控系统时代的数控技术，而CNC是指近年来的采用软件程序代替硬件逻辑电路构成的数控系统。目前的数控系统基本都属CNC，但可粗略认为两者含义基本相同。

（2）CAD/CAM　CAD是英文Computer Aided Design的缩写，意为计算机辅助设计，是当今机械设计与制造的主流设计方式；而CAM是英文Computer Aided Manufacturing的缩写，直译为计算机辅助制造，其核心与基础技术为数控加工技术。CAD与CAM技术是典型的上、下层关系联系密切的技术，两者相结合的效益远大于它们的和，因此，当今主流的CAD与CAM设计软件均是包含两者的集成软件，且集成的内容还在不断延伸，如CAE（Computer Aided Engineering，计算机辅助工程，主体技术是有限元技术）、PLM（Product Lifecycle Management，产品生命周期管理）等。

（3）与数控机床相关的术语　数控系统（Numerical Control System）、数控机床（Com-

puter Numerical Control Machine Tools 或 CNC Machine Tools）、数控铣床（CNC Milling Machines）、数控车床（CNC Lathes 或 CNC Turning Machines）、立式数控铣床（CNC Vertical Milling Machines）和卧式数控铣床（CNC Horizontal Milling Machines）、加工中心（Machining Center）、立式加工中心（Vertical Machining Center）、卧式加工中心（Horizontal Machining Center）、DNC（Direct Numerical Control，直接数控，又称在线加工）、反馈（feedback）、开/闭环数控系统（Open/Closed－Loop Numerical Control System）、伺服机构（Servo-Mechanism）等。

（4）与数控加工编程相关的术语　坐标轴（Coordinate Axis，简称轴）、坐标系（Coordinate System）、机床坐标系（Machine Coordinate System）与机床坐标原点（Machine Coordinate Origin）、工件坐标系（Workpiece Coordinate System）与工件坐标原点（Workpiece Coordinate Origin）、参考点（Reference Position）、绝对/增量/相对位置（Absolute/Incremental/ Relative Position）、绝对/增量/相对坐标（Absolute/ Incremental/ Relative Coordinate）、绝对/增量/相对尺寸（Absolute/ Incremental/ Relative Dimension）、直线/圆弧插补（Line /Circular Interpolation）、顺/逆时针圆弧（Clockwise/ Counter-clockwise Arc，缩写为CW/CCW）、零点偏移（Zero Offset 或 Reference Offset）、字符（Character）、地址（Address）、坐标尺寸字（Coordinate Dimension Word）、程序段（Block）、顺序号（Sequence Number）、准备功能（Preparatory Function 或 G Function）、主轴速度功能（Spindle Speed Function 或 S Function）、进给功能（Feed Function 或 F Function）、刀具功能（Tool Function 或 T Function）、辅助功能（Miscellaneous Function 或 M Function）、程序段结束符（End of Block，缩写为 EOB，如符号“;”）、固定循环（Fixed Cycle）、加工程序（Machine Program）和零件程序（Part Program）、子程序（Sub Program）、宏程序（Macro-Program）、程序开始/结束（Program Start/Stop，用符号“%”表示）、程序编制（Programming，简称编程）、手工编程（Manual Programming）与自动编程（Automatic Programming）、倍率修调（Override）、刀具偏置（Tool Offset）、刀具半径/直径偏置（Tool Radius/Diameter Offset）、刀具轨迹（Tool Path）、刀具长度偏置（Tool Length Offset）、刀具补偿（Cutter Compensation）、复位（Reset）、奇偶校验（Parity Check）等。

（5）数控系统 MDI 面板与机床操作面板上的相关按键　具体如下：

MDI 面板上的相关按键：POS（Position，位置）、PROG（Program，程序）、OFS/SET（Offset/Setting，偏置/设定）、SHIFT（转变或上档键）、CAN（Cancel，取消）、INPUT（输入）、SYSTEM（系统）、MESSAGE（信息）、CSTM/GR（Custom/Graph，自定义/图形，这里的自定义指的是宏程序）、ALTER（替换或改变）、INSERT（插入）、DELETE（删除）、PAGE（页，配合箭头便成为翻页键）、HELP（帮助）、RESET（复位）、EOB（程序段结束符）等。

机床操作面板上的相关按键：自动（AUTO，又称 MEMORY（存储器）运行）、编辑（EDIT）、MDI（Manual Data Input 的缩写，可译为手动数据输入）、DNC（Direct Numerical Control/直接式数控或 Distributed Numerical Control/分布式数控的缩写，前者可译为在线加工）、方式选择（Mode Select，又称模式选择）、手动进给（JOG，又称点动）、增量进给（INC，Increment 的缩写）、手轮（Handle，又称手动脉冲发生器）、示教（Teach）、REF（Reference Position，参考点，也可译为回零/Home）、轴选择（Axis Select）、单段（Single Block）、空运行（Dry Run）、选择性停止（Option Stop 或 Optional Stop）、机床锁住（Ma-

chine Lock）、跳段（Block Skip 或 Option Block Skip，又称程序段跳过、跳选等）、程序重启（Program Restart）、循环启动（Cycle Start）/循环停止（Cycle Stop）、进给保持（Feed Hold）、倍率（Override）/主轴倍率（Spindle Override）/（切削）进给倍率（Feed Rate Override或 Feed Override）/快速倍率（Rapid Override）、紧急停止（Emergency Stop）、程序保护开关（Program Protect）、主轴正转（Spindle CW）/主轴停止（Spindle Stop）/主轴反转（Spindle CCW）、系统启动（Power On）/系统停止（Power Off）等

4. 应用技巧与注意事项

以上谈到的基本概念是从事数控加工编程人员必须掌握的基本概念。实际工作中经常用到的某些专业术语或其英文缩写，若能掌握其英文原意将有助于记忆与理解。例如：FANUC CNC 系统的 LCD/MDI 面板上有一个 EOB 键 ，从以上的中英文介绍中可知，它是 End of Block 的缩写，原意是程序段结束，因此，下次您再手工输入或修改程序用到该键时自然就联想起了程序段结束符。同理，数控机床操作面板的工作方式键中有一个 MDI 工作方式选择键（或波段开关 MDI 挡），如果能够理解 MDI 的英文含义，自然就想到手动数据输入方式。

1.2　数控编程基础知识

数控加工编程主要分为数控车削与数控铣削两大类，其编程知识虽然有所不同，但也存在相同的部分，本节拟讨论这部分内容。

1.2.1　程序与程序段的结构

1. 程序的结构与应用

（1）程序的结构　数控程序一般由程序开始符（单列一段）、程序名（单列一段）、程序主体和程序结束指令（一般单列一段）组成，程序最后还有一个程序结束符（单列一段）。FANUC 系统规定程序开始与程序结束符一般用“%”符号，程序名规定用英文字母 O 与非全零的四位数字组成，即 O××××。程序结束指令可用 M02（程序结束）或 M30（程序结束，返回程序头），实际使用时根据具体情况和各人的习惯而定，M30 用得较多。数控加工程序的一般格式如下：

%	程序开始符
O1000;	程序名
N10 G00 G54 X50 Y30 M03 S3000; N20 G01 X88.1 Y30.2 F500 T02 M08; N30 X90; ……	程序主体
N300 M30;	程序结束指令
%	程序结束符

（2）使用技巧与禁忌

1）程序主体是数控程序的主要部分，各种不同加工程序的差异主要集中在这一部分，

其余部分变化不大。

2）程序开始与结束符“%”是程序传输与 DNC 加工的需要，MDI 键盘输入以及直接运行数控系统存储器内的程序可以不用。注意，为节省篇幅，本书程序一般均按无符号“%”书写。

3）程序号不得为全零（即程序名不得为 O0000），数字的前零可以省略。程序号 8000～9999由机床制造厂使用，用户一般不要使用这些数字。

4）若程序头没有指定程序名，则以开始的顺序号（N××××）当做程序号。若顺序号使用了 5 位或更多数字，则以低 4 位数字作为程序名，若低 4 位为全 0，则以 0001 存储。

5）数控加工程序可分为普通数控程序（又称 NC 程序）与宏程序两类，前者各种字为常量，后者还包含变量、函数以及等式的字等。

6）普通数控程序是以程序段为单位，按照程序段的顺序执行，一般与程序段前的序号无关。

7）宏程序由于存在变量、函数等，因此可简化编程，有一定的通用性，程序具有跳转功能等。

2. 程序段的结构与应用

（1）程序段的格式　程序段是构成程序主体的基本单元，其一般由程序段序号、各种功能字、数据字和程序段结束符“;”等组成，每个字均由地址符与数字组成。

数控铣床与加工中心程序段的基本格式：

$$N_\ G_\ X_\ Y_\ Z_\ \left\{\begin{matrix} I_\ J_\ K_ \\ R_ \end{matrix}\right\}\ T_\ \left\{\begin{matrix} D_ \\ H_ \end{matrix}\right\}\ F_\ S_\ M_;$$

数控车床程序段的基本格式：

$$N_G_\left\{\begin{matrix} X_Z_ \\ U_V_W_ \end{matrix}\right\}\ \left\{\begin{matrix} I_K_ \\ R_ \end{matrix}\right\}\ F_\ T_\ S_\ M_;$$

其中，N_为程序段序号（任选项），可选 N0000～N9999，或不写。

G_为准备功能指令，可选 G00～G99。

X_、Y_、Z_为尺寸字，表示刀具沿相应坐标轴的位移终点坐标值，它是模态参数，未发生改变的可以不写。

U_、V_、W_为尺寸字，表示刀具沿相应坐标轴位移终点的增量坐标值，它是模态参数，未发生改变的可以不写，这组尺寸字仅用于数控车削系统。

I_、J_、K_/R_为圆弧插补时圆心相对于圆弧起点的坐标/圆弧半径表示，它是非模态参数。

T_为所选刀具号，数控铣削程序可以不写；数控车削程序中还包含刀具补偿号。

D_/H_为刀具补偿号，指定刀具半径/长度补偿存储单元号，主要用于铣削系统。

F_为进给速度指令。

S_为主轴速度指令。

M_为辅助功能指令。

；为程序段结束符。

应当说明的是，数控铣床的增量坐标编程一般不用 U_ V_ W_，而是采用 G91 指令指定 X_ Y_ Z_为增量坐标。

（2）程序段结构使用技巧与禁忌

1）字符是组成数控加工程序的最小单位；若干字符构成指令字，又称功能字，简称为字；若干字按一定规则排列再加上程序段结束符即构成程序段。

2）指令字一般由英文字母加数字组成，这个英文字母又称地址符，主要有7种类型，分别为：顺序号字（N）、准备功能字（G）、尺寸字（X、Y、Z、U、V、W、J、I、K、R、P等）、进给功能字（F）、主轴速度功能字（S）、刀具功能字（T）和辅助功能字（M）。

3）程序段是数控系统执行程序的基本单元，包含一系列的操作，又称为数控加工程序中的一条语句。

4）现代数控系统的程序段一般均采用字地址可变程序段格式。每个程序段中指令字的数量与位置可变，某些指令字具有续效性，即其在上一程序段中写明而本程序段又不变化时可以不再重写。为阅读程序方便，程序段中的指令字之间常加一个空格。

以上介绍的程序段格式书写顺序为一般习惯，仅供参考，以下两程序段执行时效果相同：

N10 G03 X28.0 Y15.0 R10.0 F50 T01 S1000 M08；(习惯顺序)

N10 M08 T01 S1000 F50 G03 X28.0 Y15.0 R10.0；(颠倒顺序，不影响程序段执行)

5）数控程序的执行以程序段为基本单元，每一个程序段中按各指令优先级高低顺序执行，每个程序段中所有指令字的操作全部执行完成后才转而执行下一个程序段。

6）程序开始与结束符“%”主要用于程序传输的输入与输出场合，不影响程序的执行，因此，手工输入数控加工程序时可不输入。

7）程序段序号N_又称顺序号字，其数字一般为1～4位整数，数字的顺序并不代表程序段的执行顺序，其主要用于程序的校对、检索和修改。另外，在某些固定循环指令中标志循环程序的开始和结束程序段号，在宏程序中也经常用于程序跳转等的指针。

因此，若程序中不用到某些固定循环指令或宏程序时，程序段号字N_将变得可有可无，任意顺序书写、部分书写等均可。程序仍将按程序段顺序执行。

程序中是否使用程序段号字取决于个人的习惯，使用时便于阅读与修改程序，但要占用CNC系统内存。另外，数字一般是按一定规律排列的，常见的为公差为2、5、10的等差数列，程序段太多时允许循环使用。

8）准备功能字G_，其地址符是G，所以又称为G功能、G指令或G代码。其指令的功能取决于具体的数控系统。

9）尺寸字也叫尺寸指令，在程序段中主要用来指定机床上刀具运动到达的坐标位置，表示暂停时间等的指令也列入其中。地址符用得较多的有三组：第一组是X、Y、Z、U、V、W等，主要用于指定到达点的直线坐标尺寸，有些地址（例如X）还可用于指令G04之后指定暂停时间；第二组是A、B、C等，主要用来指定到达点的角度坐标；第三组是I、J、K，主要用来指定零件圆弧轮廓圆心点的坐标尺寸。尺寸字地址符的使用虽然有一定规律，但是各系统往往还是有一点差别，例如FANUC 0i系统还用P指定暂停时间，用R指定圆弧半径等。

坐标尺寸字的地址符与数控系统有关，如车削系统用X、Z指定绝对坐标，用U、W指定增量坐标。而铣削系统的绝对与增量坐标均用X、Y、Z（用G90与G91区分）。

尺寸字后数字的单位可用G21/G20选择，最小输入单位可由参数设定，一般设置为IS-B

增量系统，对于米制单位一般为 0.001mm。尺寸字后的数字省略小数点后的数值单位可有两种表示方法：计算器型小数点输入和标准型小数点输入，可由参数 No.3401#0（DPI）设定。当用计算器型小数点表示法时，不带小数点输入时数值的单位认为是 mm。而用标准型小数点输入法表示时，不带小数点输入时数值的单位是最小输入增量单位，一般为 0.001mm，具体见表 1-1。从表中可以看出，当控制系统设置为标准型小数点输入时，若忽略了小数点，则将指令值变为了 1/1000，此时若加工，则有可能出现事故。因此建议编程者书写尺寸字后的数字时养成书写小数点（如 X1000.）的习惯。

表 1-1 尺寸字数字小数点的作用

程序指令	计算器型小数点编程	标准型小数点编程
X1000（指令值没有小数点）	1000 mm	1 mm
X1000.（指令值有小数点）	1000 mm	1000 mm

10）进给功能字 F_用于指定数控加工过程中刀具的切削进给速度，数控车削与数控铣削的使用习惯与方法略有差异。

数控车削的进给速度有每分钟进给与每转进给两种，分别用指令 G98 与 G99 指定，默认设置为常用的每转进给。每分钟进给与每转进给的单位分别为 mm/min 与 mm/r。

数控铣削的进给速度也可设置为每分钟进给与每转进给两种，分别用指令 G94 与 G95 指定，默认设置为常用的每分钟进给，单位同上，但数控铣削中基本不用每转进给。

进给速度可以用机床操作面板上的进给倍率调整旋钮在一定范围进行调节。

11）主轴速度功能字 S_，其地址符是 S，所以又称为 S 功能或 S 指令。它的功能是用来指定主轴的速度，其控制方式有恒线速度控制与恒转速控制两种，分别用指令 G96 与 G97 设定，其速度单位分别为 m/min 和 r/min。数控铣削主要用恒转速控制。数控车削恒转速与恒线速度控制均有应用，当使用恒线速度控制时，注意与最大速度钳制指令 G50 联合应用。

12）刀具功能字 T_，用地址符 T 及随后的数字表示，所以又称为 T 功能或 T 指令。数控车削与数控铣削的使用方法略有差异。

数控车削常用 T（2+2）指令格式，即 T□□△△，前两位数字□□用于指定刀具号，并兼有换刀指令功能，后两位数字△△用于指定刀具偏置号，可调用刀具补偿值。

数控铣削常用地址符 T 加两位数字组成，即 T○○，仅用于刀具号的指定，刀具补偿值的调用与换刀动作必须用另外的指令字 D××和 H××与 M06 指定。

由于数控铣床加工为手工换刀，所以程序中不用刀具功能指令字 T。

13）辅助功能字 M_由地址符 M 及随后的两位数字组成，所以又称为 M 功能或 M 指令。辅助功能指令主要用于控制数控机床辅助装置的接通与关断，其控制信号一般为开关量。默认设置每个程序段中只能有一个 M 指令，否则，写在后面的有效。

14）程序段结束符，是英文状态下输入的分号符号（;），在 MDI 面板上是按下程序段结束符 EOB 键入，不会书写错误，但在 PC 上编程时必须注意。

1.2.2 主、子程序及子程序调用

1. 主、子程序的概念

数控系统可以直接执行某一个加工程序，也可通过程序中相关指令调用某一程序，被调

用的程序称为子程序，直接执行并调用子程序的加工程序可称为主程序。

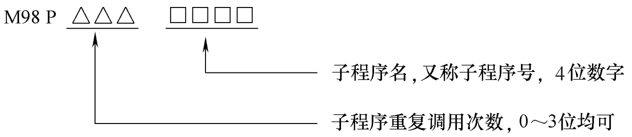
2. 主、子程序的结构

FANUC 0i 系列数控系统的主、子程序结构基本相同，仅结束指令不同，前者一般为 M30 或 M02，而后者一般为 M99。

3. 子程序调用指令及程序执行分析

FANUC 0i 系列数控系统的子程序调用指令为 M98，子程序可由主程序调用，也可由子程序调用，后者称为子程序嵌套。

子程序调用格式为：



一个调用指令可以重复调用子程序最多达 999 次，当不指定重复次数时，则子程序只调用一次。

M98 指令调用子程序，程序流转向子程序并开始执行，直至子程序结束指令 M99，程序流转回调用子程序的 M98 指令程序段下一个程序段开始执行。图 1-1 所示为子程序调用 3 次的执行顺序。

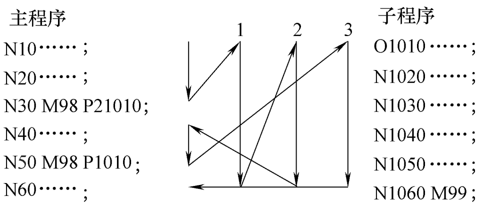


图 1-1　子程序调用示例

4. 使用技巧与禁忌

（1）主、子程序结构与指令　不同数控系统的主、子程序结构与调用指令会有差异，有兴趣的读者对比西门子数控系统就一目了然了。

（2）子程序嵌套深度　FANUC 0i 系列数控系统的子程序最多允许嵌套 4 级，如图 1-2 所示。

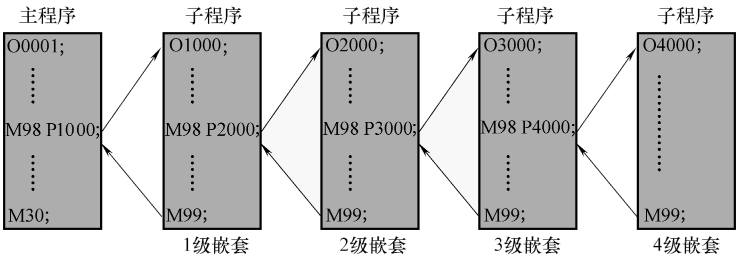


图 1-2　子程序嵌套

（3）子程序的一般应用分析

1）零件上具有若干处相同的轮廓形状。在这种情况下，只要编写一个加工该轮廓形状的子程序，然后用主程序多次调用该子程序的方法完成对工件的加工。

2）加工中反复出现具有相同轨迹的走刀路线。如果相同轨迹的走刀路线出现在某个加工区域或在这个区域的各个层面上，采用子程序编写加工程序比较方便，在程序中常用增量值确定切入深度。

3）在加工较复杂的零件时，往往包含许多独立的工序，有时工序之间需要适当的调

整。为了优化加工程序，把每一个独立的工序编成一个子程序，这样形成了模块式的程序结构，便于对加工顺序进行调整，主程序中只有换刀和调用子程序等指令。

（4）子程序的特殊应用分析

1）在子程序结束指令之后用 P 指定一个顺序号作为返回到主程序中的目标，这时子程序结束时不返回调用该子程序的那个程序段的下一个程序段，而是返回到由 P 指定其顺序号的那个程序段。程序流示例如图 1-3 所示。

注意，此方式必须在自动运行方式下才有效。此方法比起正常的返回到主程序方法要耗费长得多的时间。

2）在主程序中执行 M99，可控制程序流返回主程序起点。若主程序中书写为 M99 Pn，则控制主程序流转到顺序号为 n 的程序段。这两种应用与“程序段跳跃”功能有机结合，可达到特殊的效果。程序流向如图 1-4 所示。

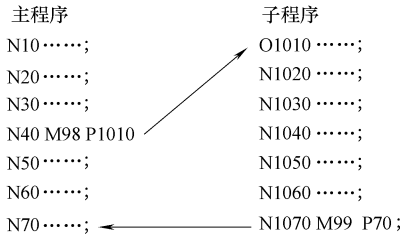


图 1-3 子程序特殊应用示例 1

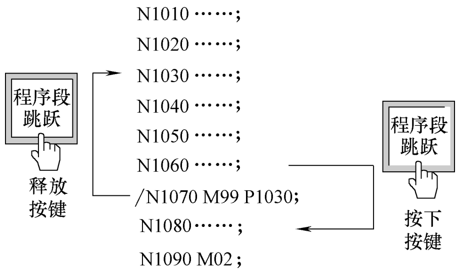


图 1-4 子程序特殊应用示例 2

读懂以上程序后可以看出，利用机床操作面板上的“程序段跳跃”按键控制，可实现数控机床的考机运行。

3）图 1-5 所示的程序示例，也具有考机运行的功能。要结束这个程序，必须将包含 M02 或 M30 的程序段放置在适当的位置，并将“程序段跳跃”开关设置为断开。这个开关要先设定，不要临时设定。

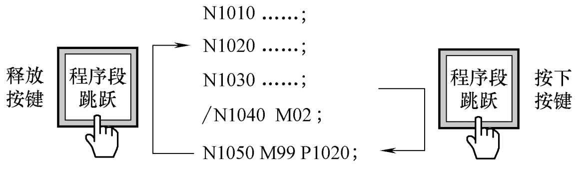


图 1-5 子程序特殊应用示例 3

1.2.3 数控加工 G 指令表阅读时的注意事项

FANUC 公司的官方操作说明书中有 FANUC 0i Mate-TC 数控车削系统和 FANUC 0i MC 数控铣削系统的准备功能字表。

（1）阅读与学习 G 指令表时需注意事项

1）准备功能字的 G 指令分为模态与非模态两种，而模态又涉及指令组的概念。甚至个别指令（如 G60）可通过系统参数的设置而成为模态或非模态指令。

所谓模态指令是指在后续的程序段中，在同组其他 G 指令出现之前一直有效，即模态指令具有续效性。而非模态指令不能续效，只在所出现的程序段中有效，下一个程序段需要时，必须重新写出。

注意：00 组 G 指令中，除了 G10 和 G11 以外都是非模态 G 指令，其余组的 G 指令均是模态指令。另外，数控铣削系统中的 G60 指令可以通过参数 No. 5431 #0（MDL）设置为 00

或01组指令。

2）数控车削系统与数控铣削系统的指令是不完全相同的。

3）注意每一组指令有一个开机默认的指令，表中G指令左侧有符号“◤”的指令是FANUC系统出厂状态的开机默认指令，实际使用的数控系统可能根据操作者的使用习惯而通过系统参数的设置而改变。例如数控铣削系统中通过参数No. 3402#0（G01）可以设置接通电源及清除状态时的模态是G00还是G01。

4）参数No. 3402 # 6（CLR）可设置MDI操作面板上的复位键使系统进入哪种状态，CLR =0为系统复位状态，而CLR =1为系统清除状态。系统清除状态等同于开机接通电源状态，它使系统所有模态指令恢复到默认状态；而复位状态仅仅是光标返回程序头，其他模态指令的模态保持不变。系统一般默认设置为CLR =0。

5）同组的G代码在同一个程序段中只能出现一个，若出现两个，则写在后面的有效。

6）数控车削系统的工作选择指令默认为G18，数控铣削系统则取决于机床的布置形式，立式数控铣床默认设置为G17。

7）国内生产的数控机床的坐标值单位选择指令默认为G21。

8）数控车削系统G指令的形式有三种（A、B和C），由参数No. 3402的# 6（GSB）和# 7（GSC）共同设定，默认设置为第A组。

9）数控车削系统的坐标值为绝对或增量值编程是由坐标地址符决定的，而数控铣削系统则由指令G90/G91设定，开机默认指令由参数No. 3402#3（G91）设定，默认设定为绝对坐标值编程指令G90。

10）主轴转速控制上，数控车削与数控铣削系统均默认设置为恒转速控制（G97）。而进给速度方面，数控车削默认设置为每转进给（G99），数控铣则默认设置为每分钟进给（G94）。这样一种设置比较符合生产习惯。

（2）学习技巧与禁忌

1）不同的数控系统，G指令是不同的，因此实际使用数控机床前一定要通读官方的数控机床操作手册，注意与你平时学习的G指令的区别。

2）准备功能字后的数字一般为两位，大部分机床的前置“0”允许省略，即能够识别G1就是G01等。

3）注意记住数控系统的开机默认G指令。

4）以上多次谈到开机或复位状态的默认指令可由参数设置，可见系统参数设置的重要性。实际上，学习数控机床到一定程度时必然会涉及系统参数的设置。系统参数的设置对数控机床的工作影响很大，因此新机床使用之前必须要获得数控系统的参数设置状态，必要时自己必须进行备份，否则，使用过程中系统参数修改乱了后就无法恢复到出厂状态。

1.2.4　基本编程指令分析

虽然数控加工指令与机床形式及数控系统有关，但数控加工的原理是相同的，因此，其基本的编程指令也大致相同。这里谈到的基本指令指的是基于数控技术插补原理设置的，或各种数控系统通用的编程指令，典型的有G00/G01/G02/G03、G04、G20/G21、G28/G30、G17/G18/G19和G90/G91等。其中，G00/G01/G02/G03基本通用。

1. 英制/米制转换指令 G20/G21

（1）指令格式　数控程序中坐标值的单位可以是英制或米制，可由 G 指令指定，或由系统参数设定，指令如下：

英制单位指令：G20，单位为 in（英寸）。

米制单位指令：G21，单位为 mm（毫米）。

（2）应用技巧与禁忌

1）G20/G21 代码必须在设定坐标系之前在一个单独的程序段中指定。

2）程序执行过程中，不能切换 G20 和 G21。

3）国内数控机床的默认设置一般是米制单位，因此很多人编程时往往省略不写 G21 指令。

4）若需加工英制单位的工件时，建议将英制尺寸转换为米制尺寸后进行编程，这样可以不必再配置一套英制单位的量具。

5）系统参数 No. 0000 # 2（INI）用于默认单位的设置，INI = 0 时为米制单位，INI = 1 时为英制单位，国内生产与使用的数控机床默认设置为米制。

2. 工作坐标平面选择指令 G17/G18/G19

学习坐标平面涉及坐标系与坐标轴的概念。

（1）坐标系、机床坐标系与工件坐标系　坐标系的确定必须遵循 GB/T 19660—2005《工业自动化系统与集成　机床数值控制　坐标系和运动命名》的要求。

数控机床的坐标系是一个右手直角笛卡儿坐标系，如图 1-6 所示，包括基本的直线运动坐标轴 *X*、*Y*、*Z* 和绕相应轴旋转的圆周进给坐标轴 *A*、*B*、*C*。对于具体的数控机床，其各运动轴的定义在 GB/T 19660 中有详细的规则，这里不展开讨论。

另外，数控编程时根据图样需要确定的坐标系称为编程坐标系，而工件装夹后通过对刀确定的坐标系称为加工坐标系，这两者可统称为工件坐标系。两者常常是重合的。

（2）机床原点、机床参考点与工件坐标系原点　这几个点实际上是确定相应坐标系的位置。

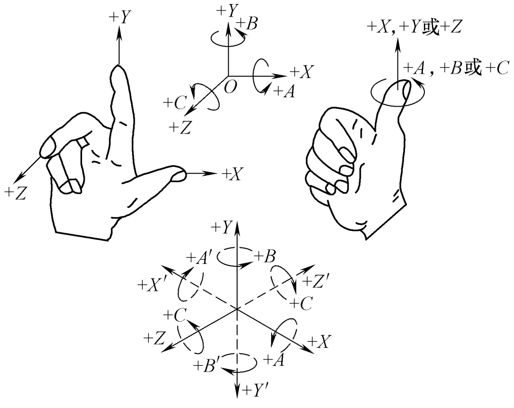


图 1-6　右手直角笛卡儿坐标系

机床原点是确定机床坐标系位置的参考点，其位置由机床设计和制造企业确定。

机床参考点是数控机床上一个特殊的固定点，其位置由数控系统以及各运动轴的行程开关或位置检测装置等确定。该点与机床原点的位置关系由数控系统调试确定，实际上机床原点的位置只有在机床参考点的位置确定之后才能体现。

工件坐标系原点在编程时由编程人员根据工件图样的特点与编程的需要确定。但工件每次安装在机床上的位置往往是不确定的，机床操作人员必须使数控系统能够确定编程原点在机床上的位置，才能保证加工的正确性，这个操作称为“对刀”。

（3）坐标轴的方向确定　遵守的是工件静止不动、刀具相对于工件运动的原则，这个方向是坐标轴的正方向，即图 1-6 中实线所示的方向。图中虚线的方向正好相反，即刀具固

定不动、工件相对于刀具的运动方向。

（4）关于坐标系的学习技巧

1）各种类型的机床，其坐标轴的定义由标准规定，但操作者实际接触的机床往往是有限的，因此，不记住坐标轴的定义也没有太大的关系，只需牢记自己使用的数控机床各坐标轴的定义即可。一般常见的有卧式数控车床与立式数控铣床。

2）数控机床的操作者不必深究机床原点在哪里，实际上机床原点的位置在机床参考点位置确定后才能体现。如果机床返回参考点操作后数控系统位置显示为全零，则可理解为机床参考点就是机床原点。当然，若不为零，则显示的绝对坐标值就是机床参考点在机床坐标系中的位置，机床原点的位置就知道了。

3）工件固定不动、刀具相对于工件的运动方向为坐标轴的正方向这个原则必须牢记在心。

4）“对刀”操作是每一位数控编程与操作人员必须熟练掌握的知识，也是学习数控机床必需的知识。

5）每一种数控系统必须至少提供一种对刀指令与方法。

6）在数控系统的实际位置画面的综合显示方式中显示的“机床坐标”指的是机床坐标系中的坐标，当机床参考点与机床原点重合时，其正好也是相对于机床参考点的坐标值。

（5）工作坐标平面及其选择指令 G17/G18G19　工作坐标平面简称工作平面，在直角坐标系中有三个——*XY* 平面、*ZX* 平面和 *YZ* 平面，如图 1-7 所示，其对应的指令格式如下：

坐标平面选择指令：G17/G18/G19

坐标平面选择指令与选择的工作平面见表 1-2。

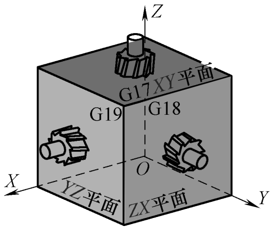


图 1-7　坐标平面

表 1-2　坐标平面选择指令

G 指令	指定的工作平面
G17	*XY* 平面
G18	*ZX* 平面
G19	*YZ* 平面

（6）关于坐标平面选择指令的应用技巧与禁忌

1）某些指令必须在指定的坐标平面中进行，如平面圆弧插补指令和刀具半径补偿指令等。如果程序中没有出现坐标平面选择指令，那是因为系统默认指定了该指令。同样，有些指令的执行与坐标平面选择无关，如直线移动指令等。

2）系统通电或复位时默认的工作平面可由系统参数 No. 3402 的#1 和#2 设定，对于立式铣床默认设置为 G17 指定的 *XY* 坐标平面，对于数控车床默认设置为 G18 指定的 *ZX* 坐标平面。

3）坐标平面选择指令 G17/G18/G19 是同一组的模态指令，可以相互注销。

3. 绝对坐标、增量坐标与相对坐标的概念

坐标是确定数控机床刀具位置及运动轨迹的位置参数，在数控编程与加工过程中涉及坐标的概念有以下三种：绝对坐标、增量坐标与相对坐标。

（1）绝对坐标　指刀具当前位置在工件坐标系中的坐标值，刀具的移动不改变坐标原点的位置，仅仅是刀具坐标位置的变化。在图样编程过程中，绝对坐标是相对于编程坐标系的坐标值。在机床加工时，当加工坐标系未建立之前，刀具的绝对坐标是相对于机床坐标系（或机床参考点）的坐标值。加工坐标系一旦建立，则刀具的绝对坐标是相对于加工坐标系原点的坐标值。

（2）增量坐标　指数控编程时刀具移动指令所指定的坐标位置相对于上一移动指令的坐标位置的差值，也就是刀具移动指令指定刀具移动的实际距离。增量坐标指定的刀具当前位置与工件坐标系及机床参考点等无直接的联系。

（3）相对坐标　该概念出现在数控机床操作过程中，数控系统 MDI 面板上 LCD 显示画面中的坐标位置显示画面中。相对坐标不等于增量坐标。相对坐标是指数控机床操作过程中，操作者临时指定某一点为基准点（具体是将该点的相对坐标设置为 0），刀具移动时所显示的刀具位置均是以这一个临时基准点为参考点的坐标值，这个坐标值就是相对坐标。相对坐标常常用于刀具对刀和设置刀具偏置值等场合。

（4）学习技巧与禁忌

1）绝对坐标与增量坐标是数控编程常用的两个概念，数控铣削系统一般用指令 G90/G91 指定，数控车削系统则是用地址符 U/W 区分。

2）绝对坐标与相对坐标是数控机床操作时可能用到的两个概念，后者常用于“对刀”等操作。

3）相对坐标绝不等于增量坐标，实际中常有初学者将两个概念混淆。

4. 暂停指令 G04

（1）指令格式　暂停指令又称停刀指令或准确停止指令，它使程序段执行结束时暂停一段时间，暂停时间到达后，系统开始执行下一个程序段。

暂停指令格式为：G04 $\begin{Bmatrix} X_ \\ P_ \end{Bmatrix}$；

其中，X_用于指定时间，允许用十进制小数点；

P_用于指定时间，不允许用十进制小数点。

用 X_指令时，暂停时间的单位是 s，指令值范围为 0.001～99999.999。用 P_指令时，暂停时间的单位是 ms，指令值范围为 1～99999999。

（2）应用技巧与禁忌

1）指令暂停时间还可以用参数 No.3405#1（DWL）指定，单位是 r，这在数控车削加工中是有实际意义的。

2）暂停指令 G04 常用于孔加工对孔底有平整度要求、车槽加工中对槽底直径有精度要求，以及两直角边对转角有加工精度要求的场合，可实现 G09 或 G61 的准停功能。

5. 基本的插补功能指令 G00/G01/G02/G03

这 4 个指令是所有数控系统均具备的基本运动指令，几乎所有的数控系统均相同。

（1）快速定位指令 G00　主要用于刀具定位，指令刀具快速移动到指定位置。

指令格式为：G00 X_ Y_ Z_；

其中，X_ Y_ Z_指定的是终点位置坐标，可以由绝对坐标值或增量坐标值指定。当用绝对坐标指定时，是终点的绝对坐标值；当用增量值指定时，相当于刀具移动的距离。

应用技巧：

1）G00 指令移动刀具时仅关注终点的位置精度，对中间的移动轨迹并不注重。G00 指令的运动轨迹可由系统参数 No. 1401#1（LRP）设置为直线插补与非直线插补两种，如图 1-8 所示。但即使设定为直线插补，在执行指令 G28、G53 时仍执行非直线插补。

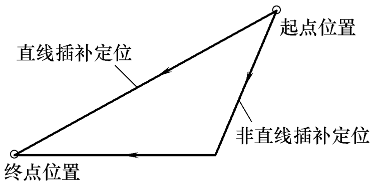


图 1-8　G00 指令的移动轨迹

2）G00 指令多用于空行程，缩短辅助时间，不能用于切削进给运动。

3）非直线插补方式下，各坐标轴的移动速度由系统参数 No. 1420 设定，不能用指令指定与改变。初学者一般不要修改这个速度设置。

4）G00 指令的移动速度可用机床操作面板上的快速倍率修调旋钮或按键在一定范围内修调。

5）G00 指令的终点位置定位精度由参数 No. 1826 确定。移动速度包括加速→匀速→减速的过程，其减速的过程必须确认定位精度在参数 No. 1826 设定的范围内，这个过程称为“到位”检测。

6）执行“到位”检测虽然定位精度很高，但加工效率略有下降，故系统提供了参数 No. 1601#5（NCI），可在程序运行时不执行“到位”检测。数控系统的默认设置是执行“到位”检测。

7）非直线插补方式下的运动轨迹一般为折线，其轨迹形状与两轴（或三轴）的增量坐标值有关，为不确定的折线。因此，加工时必须注意可能出现的干涉现象。必要时可分轴快速定位。例如：卧式数控车床常常先 X 轴退刀，然后再 Z 轴退刀；立式数控铣床常常是先 Z 轴退刀，然后再 X、Y 轴退刀。

8）开机之初，机床返回坐标参考点之前，G00 指令的快速移动无效。

应用禁忌：

1）G00 指令格式中不能指定 F_指令，即使指定也不起作用。

2）G00 指令常被称为快速移动指令，但这里的快速移动仅仅是相对于 G01/G02/G03 而言。这种说法不能突出“定位”的特点，所以不建议采用。但从其多用于空行程移动缩短辅助时间的角度来说，这种说法也是可以理解的。

3）严禁 G00 指令用于切削加工。实际中有见操作者用机床倍率调节开关将 G00 指令的刀具移动速度调到最小时手动移动刀具切削加工的现象，这是违规的。

（2）直线插补指令 G01　指定机床的各直线运动轴以联动方式控制刀具按直线插补到规定的位置，其刀具的实际移动速度由进给功能指令 F_指定，这个移动速度属于切削加工的进给速度。

指令格式为：G01 X_Y_Z_F_；

其中，X_Y_Z_指定的是终点位置坐标，可以由绝对坐标值或增量坐标值指定。

G01 与 G00 最显著的差异是其更关注中间过程的轨迹精度与移动速度，主要用于切削加工。

应用技巧与禁忌：

1）G01 指令允许 3 轴直线插补。

2）G01 控制刀具的移动速度可由指令指定，并可用机床操作面板上的进给倍率调节开关在一定的范围内进行修调。

3）G01 指令指定的移动速度单位与机床的类型有关，数控车床默认设置为每转进给（G99），而数控铣床为每分钟进给（G94）。

4）由于进给功能指令 F 具有续效性，因此，实际程序的某程序段中可能未出现功能字 F_。

5）G01 指令执行时各坐标轴的实际移动速度与终点增量坐标以及指令的进给速度有关，如图 1-9 所示。假设指令为 G01 Xα Yβ Zγ Ff，则各轴的移动速度为$f_X = \dfrac{\alpha}{L}f$，$f_Y = \dfrac{\beta}{L}f$，$f_Z = \dfrac{\gamma}{L}f$。其中 $L = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$，$f = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2 + f_Z^2}$。

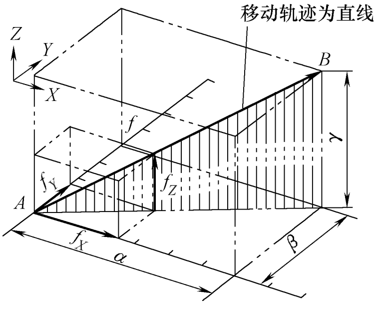


图 1-9 直线插补轨迹与速度

（3）圆弧插补指令 G02/G03 指定机床中的两个坐标轴以联动的方式在相应的坐标平面中作圆弧插补运动，刀具的移动速度由进给功能指令 F_指定，与直线插补指令共用。该指令主要用于圆弧轨迹的加工。

指令格式为：$\begin{Bmatrix} \text{G17} \\ \text{G18} \\ \text{G19} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{G02} \\ \text{G03} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{X_ Y_} \\ \text{X_ Z_} \\ \text{Y_ Z_} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{I_ J_} \\ \text{I_ K_} \\ \text{J_ K_} \\ \text{R_} \end{Bmatrix}$ F_；

其中，G17/G18/G19 指定圆弧插补的工作平面 *XY/ZX/YZ*。

G02/G03 指定圆弧插补的运动方向——顺时针/逆时针圆弧插补，如图 1-10 所示。

X_ Y_ Z_指定圆弧的终点位置坐标。当用绝对坐标指令（G90）时为终点的绝对坐标值；当用增量坐标指令（G91）时为终点相对于起点的坐标增量。

I_ J_ K_指定圆心位置，具体为圆弧起点到圆弧中心的矢量在相应坐标轴上的分量，I、J、K 分别对应 *X*、*Y*、*Z* 坐标轴。它与圆弧终点坐标位置是绝对值指令还是增量值指令无关，始终为增量值坐标。对于尺寸字 I0、J0、K0 可以省略不写。指定时没有顺序要求。

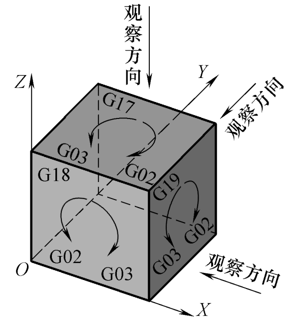


图 1-10 圆弧插补方向判断

R 也是指定圆心位置，为带符号的圆弧半径。小于 180°的圆弧用正值表示，正号可以不写；大于 180°的圆弧用负值表示；等于 180°的圆弧，用正、负值均可，一般用正值。

F 是沿圆弧插补方向的进给速度，即刀具当前位置处切线方向的速度。

应用技巧与禁忌：

1）对于具体的机床，有一个默认设置的工作坐标平面，如立式数控铣床为 G17，卧式数控车床为 G18，所以实际编程时程序中可不写插补平面指令，即简化为：

卧式数控车床的指令格式为：$\begin{Bmatrix} \text{G02} \\ \text{G03} \end{Bmatrix}$ X_ Z_$\begin{Bmatrix} \text{I_ K_} \\ \text{R_} \end{Bmatrix}$ F_；

立式数控铣床的指令格式为：$\left\{\begin{matrix}\mathrm{G02}\\ \mathrm{G03}\end{matrix}\right\}$ X_ Y_ $\left\{\begin{matrix}\mathrm{I_\ J_}\\ \mathrm{R_}\end{matrix}\right\}$ F_;

2）圆弧插补方向的判别方法是：从坐标平面垂直轴正方向向负方向看，坐标平面内的圆弧是顺时针方向为 G02，逆时针方向为 G03，如图 1-10 所示。

3）圆弧圆心的指定方法有两种：圆心坐标编程（I、J、K 编程）和圆弧半径编程（R 编程）。

① 圆心坐标编程是用圆心相对于圆弧起点的坐标值 I、J、K 指定，I、J、K 为增量值，与圆弧终点坐标位置是绝对值指定（G90）还是增量值指定（G91）无关，I、J、K 也可理解为圆弧起点到圆弧中心的矢量在相应坐标轴上的分量，如图 1-11 所示。

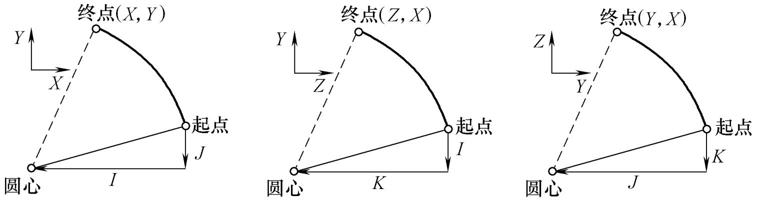


图 1-11　圆心坐标编程的 I、J、K 表示

② 圆弧半径编程是用圆弧半径 *R* 指定圆心。过起点和终点的圆弧可以有两个，即圆心角小于 180°的圆弧和大于 180°的圆弧，如图 1-12 所示。为区分指定哪个圆弧，数控系统规定：对于圆心角小于 180°的圆弧，半径值用正值表示；对于圆心角大于 180°的圆弧，半径值用负值表示；当圆弧的圆心角等于 180°时，*R* 取正、负值均可。

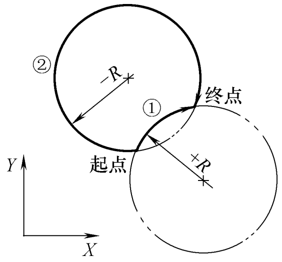


图 1-12　用 R 指令指定圆心

4）圆心坐标编程可以用一个程序段编写整圆加工轨迹，而圆弧半径编程法不行，因此，若要用圆弧半径编程法编写整圆加工轨迹，必须将整圆拆成两段或两段以上的圆弧。

5）若在一个程序段中同时指定了 I、J、K 和 R，则 R 有效。若 I、J、K 和 R 均未指定，则系统报警或相当于 G01 指令。

6）当用 I、J、K 编程时，如果终点不在圆弧上，刀具在一个坐标到达终点之后，另一个坐标将以直线移动到达终点。

7）圆弧插补中的进给速度由 F 代码指定，实际为刀具当前位置的切线方向的速度。

1.2.5　辅助功能指令 M 的应用技巧

辅助功能指令 M 是数控程序中不可或缺的功能指令，虽然其主要由机床生产厂家设计，但仍然遵循一定的规则。表 1-3 列出了数控机床常用的 M 指令。

表 1-3　数控机床常用的 M 指令

M 代码	功　能	附　注	M 代码	功　能	附　注
M00	程序暂停	非模态	M03	主轴正转	模态
M01	程序计划暂停	非模态	M04	主轴反转	模态
M02	程序结束	非模态	M05	主轴停止	模态

（续）

M代码	功　　能	附　　注	M代码	功　　能	附　　注
M06	换刀	非模态	M40	主轴低挡	非模态
M08	切削液开启	模态	M41	主轴高挡	非模态
M09	切削液关闭	模态	M30	程序结束并返回	非模态
M19	主轴定向停止	非模态	M98	子程序调用	模态
M29	刚性攻螺纹	模态	M99	子程序结束并返回	模态

M 指令的应用技巧与禁忌表现如下：

（1）一定的通则

1）除数控系统保留的部分 M 代码（如 M98、M99 等）外，其余 M 代码一般由机床生产厂家设计，不同系统和厂家数控机床的 M 指令可能会有一定的差异，但 M00～M05 和 M30 的含义基本一致。

2）一般情况下，一个程序段中只能有一个 M 代码，若书写多个 M 代码则最后一个有效。例如执行程序段“S600 M03 M08”，机床仅仅是开切削液，主轴并不正转。

3）系统也可以通过参数 No. 3404#7（M3B）设置为同一程序段最多可以指定 3 个 M 代码。

4）要注意，M 指令也有模态与非模态之分。

（2）常用 M 指令的功能

1）程序暂停 M00 和选择暂停指令 M01。当程序执行到指令 M00 时，系统暂停，但各种模态数据仍然保留，仅停止主轴（注：有的机床不停主轴）、切削液等。当按下 循环起动 按钮，系统继续执行。而选择暂停指令 M01 是一种可选择的暂停指令，当机床操作面板上的 选择停 按键按下时，其与 M00 功能相同；当 选择停 按键释放时，则程序执行至 M01 时，机床无任何动作，直接跳过执行。有的机床称该指令为选择暂停指令。

应用技巧：暂停指令可用于加工过程中工件尺寸的测量、数控车削加工时工件的调头、具有齿轮传动变速系统的手动变速、加工过程中的手工排屑等操作。其中选择暂停指令 M01 可在批量生产时实现定期或不定期的抽检等。

某些厂家的机床，执行 M00 和 M01 指令时机床主轴不停转，此时必须在程序中配合使用 M05 指令使主轴停转。

2）主轴起动与停止指令 M03/M04 与 M05。其中主轴起动指令包括主轴正/反转指令 M03/M04，M05 指令是主轴停止指令。

应用技巧：

① 主轴起动指令应用广

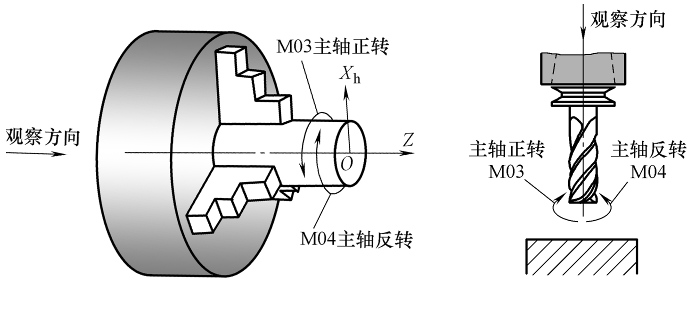


图 1-13 主轴旋转方向判断

a）车床　b）铣床

泛，几乎每一个数控加工程序都要用到。

② 理论上程序中用到了主轴起动指令，必然与主轴停止指令 M05 配合使用，但实际程序中却常常见不到 M05，实际上，这个动作往往集成到 M30 和 M02 中去了。

③ 主轴正、反转方向的判断可参见图 1-13。对于车床，从主轴箱向尾座方向看，顺时针为正，逆时针为负；对于铣床，从主轴向工作台看，顺时针为正，逆时针为负。

3）程序结束指令 M02 和 M30。由表 1-3 可见，M02 指令称为程序结束指令，而 M30 指令常称为程序结束并返回程序头指令。实际使用中，这两个指令均是放在程序的最后，用于结束程序。

M02 和 M30 的差异性分析：过去使用纸带记录和运行数控程序时，M02 仅表示程序执行结束，但纸带并不倒带，而是处于程序执行完成的状态，下一次执行该指令时必须首先将程序纸带倒回到程序开始处。M30 指令则表示程序执行完成后纸带倒回到程序开始处，如果是在加工同一个零件，则只需按下【循环起动】按钮，就可以立即执行程序。前者使用时的纸带倒带可以在机床外执行，这对于较大的数控程序可有效减少倒带占用机床的时间，提高机床的工作效率。近年来，数控系统均是以软件代替逻辑硬件的计算机形式的系统，这种系统的程序倒带仅仅表现为光标（又称指针）返回程序头，这在现代的数控系统中是瞬间完成的过程，因此，光标返回程序头这种类似于倒带的功能对机床的工作效率几乎没有任何影响。

正是基于这种特点，现代数控系统的 M02 和 M30 往往设计成功能相同。即使设计不同也没有关系，按下机床操作面板上的【RESET】键可以迅速使光标返回程序头。

为保留 M02 的特点，FANUC 0i 系统中，可以通过参数 No. 3304#5（M02）设置 M02 指令执行后光标是否返回程序头。

应用技巧：

① M02 与 M30 指令均是放在程序的最后，用于程序的结束。

② 执行 M02 与 M30 结束程序后，机床的主轴、进给、切削液等全部停止，所有模态参数取复位状态。

③ 注意到机床操作面板上的【RESET】键可以在程序执行的任何阶段停止程序并将光标返回程序头，因此，若所使用机床的 M02 指令不具有返回程序头功能，多按一次【RESET】键即可。

④ 常用的切削液操作指令有开启指令 M08 和关闭指令 M09。对于有两组切削液的数控机床，则会增加一个 M07 指令控制 2 号切削液的开启。

4）主轴定向停止指令 M19。主要用于数控加工中心换刀时主轴的定向停止。

应用技巧：部分固定循环指令必须以此指令为基础。注意，部分数控铣床未设置该功能，故部分孔加工固定循环指令无效。

5）刚性攻螺纹指令 M29。指定机床进入刚性攻螺纹模式，此时，Z 轴进给与主轴的转速之间建立起严格传动比，适合刚性夹头攻螺纹加工。

应用技巧：

① 刚性攻螺纹模式机床主轴必须装有位置编码器。

② 要使 M29 指令有效，必须确保参数 No. 5210 设置为 0。

6）主轴低/高挡指令 M40/M41，一般用于机械换挡指令，配合变频调速实现全范围无级调速。

应用技巧：

① 伺服主轴的数控机床一般不需要该辅助指令。

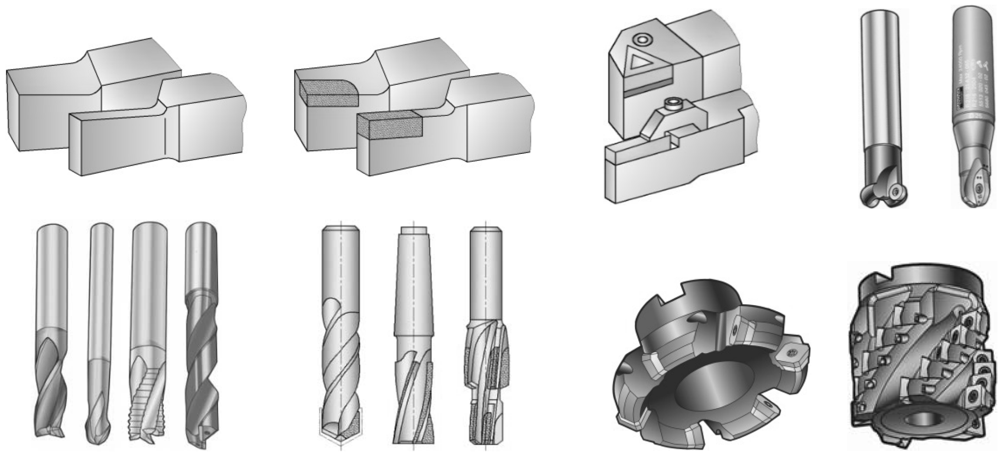
② 若机械换挡的数量大于 2 时，可能还有 M43、M44 等。

1.3　数控加工刀具和切削参数选择技巧与禁忌

数控加工虽然仍然属于金属切削加工的范畴，但有其自身的特点，主要表现为自动化程度高、连续加工过程较长、对刀所花费时间相对传统加工复杂与费时。因此，在加工刀具与切削参数选择上存在许多值得思考的问题。

1.3.1　刀具结构与选择

（1）刀具的结构　刀具按其结构形式不同可分为整体式、焊接式、机夹式及机夹可转位式，如图 1-14 所示。近年来，纯粹的机夹式刀具已不多见，市场几乎由机夹可转位式刀具统治。



a)　　b)　　c)

图 1-14　刀具的结构形式

a）整体式车、铣刀　b）焊接式车、铣刀　c）机夹可转位式车、铣刀

（2）**选择技巧与禁忌**

1）刀具的结构形式与刀具材料有关。高速钢材料多制作成整体式结构，而硬质合金材料多制成机夹式与焊接式结构。

2）刀具的结构形式与切削刃的复杂程度有关。一般切削刃复杂时多采用整体结构，如螺旋容屑槽的立式铣刀、麻花钻和铰刀等多制成整体式结构，硬质合金的焊接式刀具的切削刃尽可能做成直槽或较小的螺旋角。机夹式刀具刀片的切削刃一般制作得较为简单。

3）刀具的结构形式与刀具的结构尺寸有关。小型的刀具一般做成整体式，而较大尺寸的刀具一般做成机夹式，如面铣刀多为机夹可转位式。

4）刀具的结构形式与生产纲领有关。单件或单件小批量生产可以考虑用整体式刀具，批量生产尽可能使用机夹可转位刀具。

5）整体式刀具损坏更换新刀具时换刀与调整时间较长，而机夹可转位式刀具的转位与更换时间较短，且基本不用重新调整，只需改变刀具补偿值就可很快调整至满足要求，因此，数控加工建议尽可能采用机夹可转位的结构形式。

6）焊接式刀具由于存在焊接内应力，且刀具报废后刀杆基本不重复使用，因此实际生产中尽可能少用这种形式。

1.3.2　刀具切削部分的材料与选择

按刀具结构，任何刀具基本上可分为两部分：刀头与刀体（或刀杆）。刀体（或刀杆）多采用价格稍便宜的合金工具钢或优质碳素结构钢，而刀头是直接参与切削的部分，其材料选择是加工者最感兴趣的内容。

1. 刀具切削部分的常用材料

刀具切削部分的常用材料有高速钢和硬质合金。另外，超硬的陶瓷材料、立方氮化硼、金刚石等也有所应用。刀具涂层技术近年来应用较为普遍，取得了较好的效果。

（1）高速钢　高速钢是在合金钢中加入较多的钨、铬、钼和钒等合金元素的一种刀具材料。应用较为广泛的是 W18Cr4V，这种钢有较好的综合性能，可制造各种复杂的刀具，在国内应用较为广泛。W6Mo5Cr4V2 是增加了钼减少了钨元素的一种高速钢，其抗弯强度和冲击韧度都高于 W18Cr4V，并具有较好的热塑性和磨削性能，适合制作抵抗冲击的刀具。另外，针对一些特殊要求还开发出了部分高性能高速钢材料。

（2）硬质合金　硬质合金是由硬度和熔点很高的金属碳化物（碳化钨 WC、碳化钛 TiC、碳化钽 TaC、碳化铌 NeC 等）和金属粘结剂（钴 Co、镍 Ni、钼 Mo 等）以粉末冶金的方式烧结而成的一种高性能刀具材料。常用的硬质合金材料有钨钴类（YG 类）、钨钴钛类（YT 类）和通用硬质合金类（YW 类）三大类，对应 ISO 标准的 K、P、M 类硬质合金。TG 类硬质合金适合加工铸铁及有色金属材料，YT 类硬质合金适合加工碳钢或合金钢类的材料，而 YW 类硬质合金可加工铸铁、有色金属和钢料等。

（3）超硬类材料　随着加工技术的发展，人们研究出许多超硬的刀具材料，如陶瓷、立方氮化硼（CBN）、聚晶立方氮化硼（PCBN）和金刚石。这些刀具材料多用于特殊场合，如高速切削、干切削、难加工材料的切削、以车代磨等。这些材料的价格一般较高，且切削参数与过程不易掌握，对机床的刚性与切削速度甚至刀具刃磨等都有一定要求，常规加工中应用不多。

（4）刀具涂层　刀具表面涂层是提高刀具性能的重要方法之一，近年来应用较为广泛。常用的涂层材料有碳化钛 TiC、氮化钛 TiN 和三氧化二铝 Al_2O_3，单层涂层刀片使用较少，一般都采用 TiC-TiN 双层复合涂层或 TiC-Al_2O_3-TiN 三层复合涂层的技术。硬质合金刀片表面涂层处理后其刀具寿命可提高数倍。涂层技术不仅用于硬质合金刀片等，还在高速钢整体式铣刀或钻头的切削部分有所应用。

2. 选择技巧

1）机夹可转位刀具是数控加工首选的刀具，因此，刀具材料一般优先选择硬质合金刀具材料，如果可能的话，尽量选择涂层刀片。

2）对于可能涉及自行修磨的刀具，主要选择高速钢刀具材料。

3）如有特殊需要可考虑选择超硬类刀具材料，必要时，必须先进行工艺试验。

4）尽可能选择行业内有一定影响力的品牌刀具，且尽量固定使用某一品牌，这对于掌握刀具材料的性能、充分发挥刀具材料的性能有帮助。

1.3.3 数控车床切削部分刀具角度与加工轮廓的关系

1. 刀具切削部分的角度分析

车削刀具切削部分的角度主要包括：前角 γ_0、后角 α_0、主偏角 κ_r、副偏角 κ'_r与刃倾角 λ_s等。图 1-15～图 1-20 示出的几个典型的刀具角度供参考。

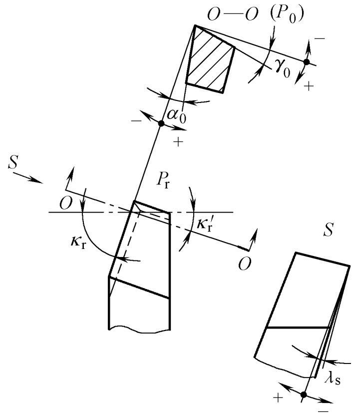


图 1-15 外圆车刀

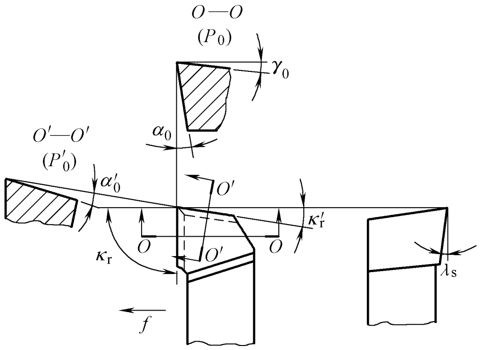


图 1-16 90°外圆车刀的标注角度

图 1-15 所示为外圆车刀的主要标注角度，其标注了 5 个主要的角度，阅读时注意各角度正、负方向的规定。

图 1-16 所示为 90°外圆车刀的标注角度，即其主偏角 $\kappa_r=90°$，该图还增加了负后角的标注。

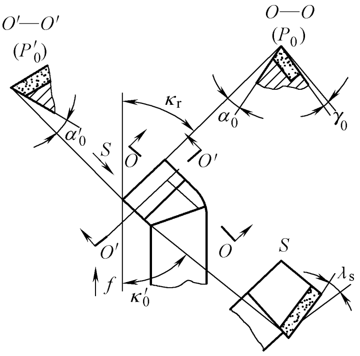


图 1-17 45°端面车刀的标注角度

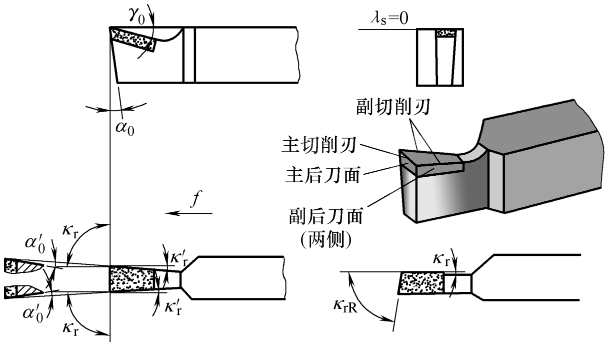


图 1-18 切断车刀的标注角度

图 1-17 所示为 45°端面车刀的标注角度，注意其刀尖的位置。

图 1-18 所示为切断车刀的标注角度，注意其主、副切削刃位置，以及主偏角 κ_r、副偏角 κ'_r。以车槽为主时，一般是其主偏角 $\kappa_r=90°$，刃倾角 $\lambda_s=0$；若以切断为主，则有可能

出现主偏角 $\kappa_r \neq 90°$的情况。

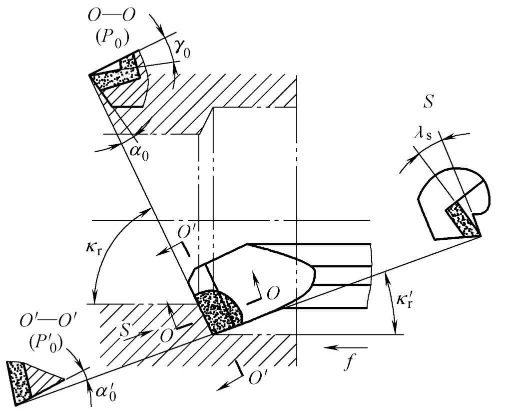


图 1-19　内孔车刀的标注角度

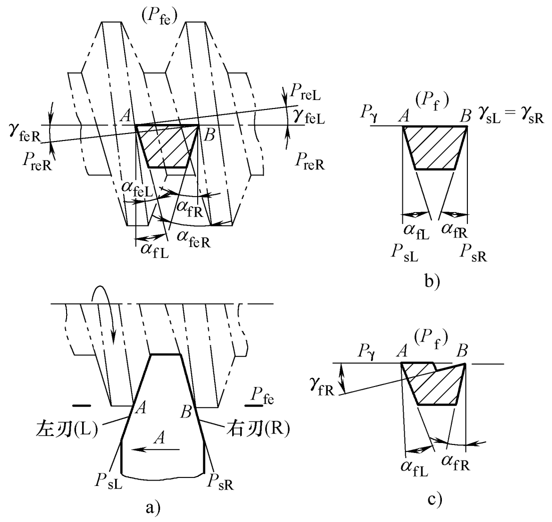


图 1-20　螺纹车刀的标注角度

a）刀具切削示意图　b）$\alpha_{fL}=\alpha_{fR}$　c）$\alpha_{fL}>\alpha_{fR}$

图 1-19 所示为内圆车刀的标注角度，注意与图 1-15 所示的外圆车刀进行比较。

图 1-20 所示为螺纹车刀的标注角度。由于螺纹车刀的进给量是每转一个导程，因此，左、右切削刃的侧后角 α_f（在假定工作平面 P_f 中度量的角度）必须有明显的差异，确保实际工作的侧后角满足要求，必要时可能还需调整侧前角 γ_f。

选用技巧与禁忌：

1）前角主要影响切削过程中的变形和摩擦，影响刀具的强度和锋利程度，涉及切屑的形态与断削效果，关系到加工表面的质量，如积屑瘤、鳞刺和振纹等。前角必须有一个合理的数值，这个合理值与刀具材料和工件材料有关。

2）后角主要影响切削时的摩擦和刀头强度。后角是禁止为负值的。

3）主偏角影响到刀具使用寿命、单位长度切削刃的载荷、刀尖强度等，适当减小主偏角是有利的，但要注意主偏角对背向力的影响非常明显，这一点在工艺系统刚性较差时尤为重要，必要时可用到略大于 90°主偏角的外圆车刀。一般情况下，粗加工与半精加工时选较大的主偏角有利于减小振动，而精加工时减小主偏角有利于减小表面粗糙度值。工艺系统刚性差时选较大的主偏角有利于延长刀具寿命。

主偏角禁止为 0，一般大于 45°。

4）副偏角主要影响已加工表面质量，同时对刀尖强度与散热有一定影响。副偏角的合理数值首先应该满足已加工表面粗糙度要求，精加工时常选择较小的副偏角，甚至磨出一段副偏角为 0 的所谓修光刃。要注意副偏角一般不为 0，较小的副偏角也有可能影响振动。

5）刃倾角主要影响切削刃的锋利性、切屑流出方向以及刀头强度等。

6）熟悉车刀的基本角度是学习刀具知识的基础。刀具角度知识广泛，立志从事机械制造的读者必须专业与系统地研读刀具角度方面的知识。

2. 刀具切削部分角度与加工轮廓的关系

数控加工广泛使用的是机夹可转位刀具。这些刀具一般由专业厂家生产，使用者一般均

可以在其产品样本上选择到合适的刀具。在选择刀具时，我们还必须关注刀具角度与加工轮廓的关系。

图 1-21 所示为外圆车刀刀头角度与加工轮廓的关系。

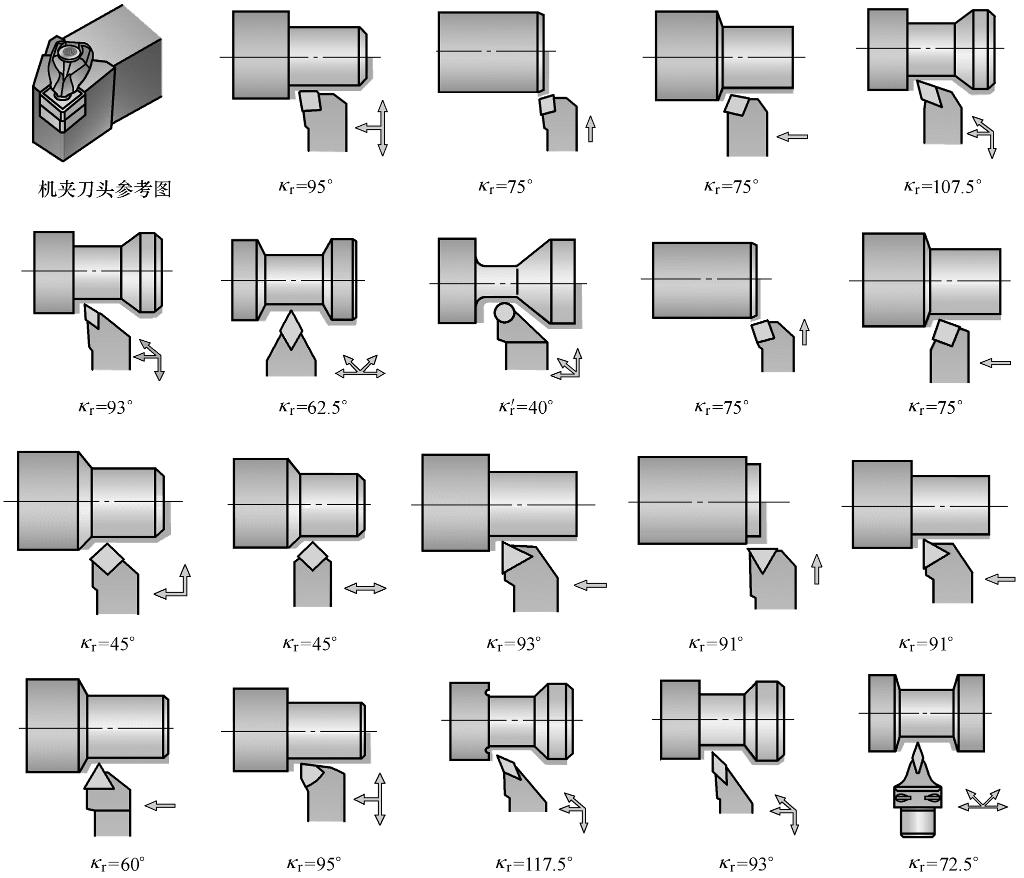


图 1-21　外圆车刀刀头角度与加工轮廓的关系

内孔车刀又称镗刀，图 1-22 列举了部分内孔可转位车刀的形式与切削面以供参考。

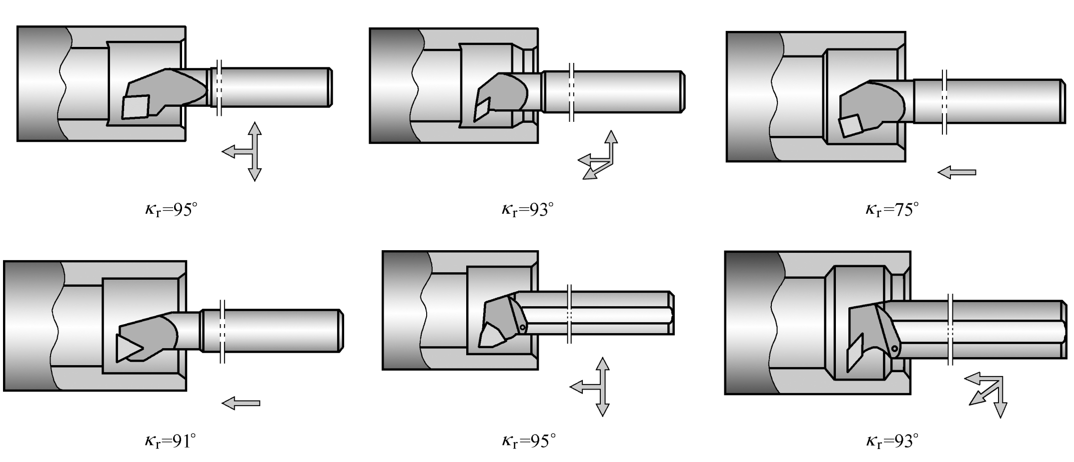


图 1-22　内孔可转位车刀的形式与切削面

图 1-23 所示为切断和切槽车刀刀头形式与加工轮廓的关系。

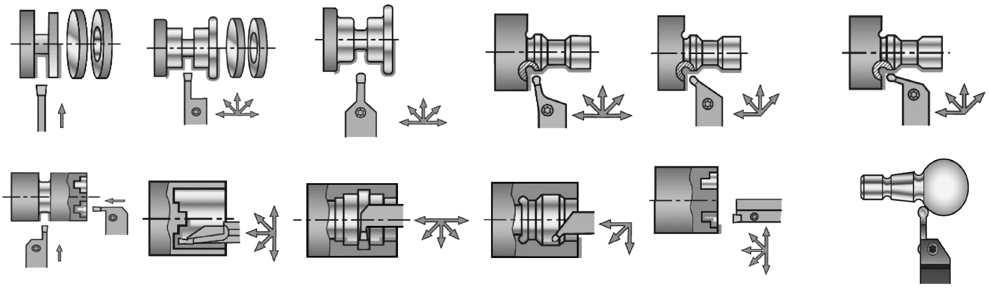


图 1-23　切断和切槽车刀刀头形式与加工轮廓的关系

图 1-24 所示为螺纹车刀刀头、加工方式与加工轮廓。

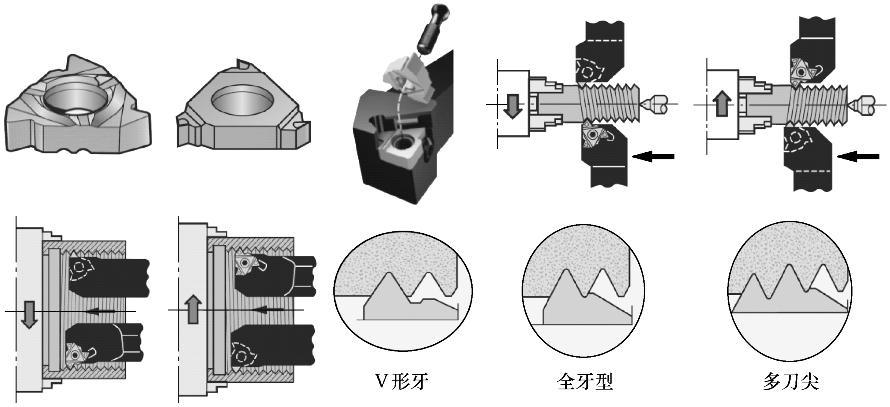


图 1-24　螺纹车刀刀头、加工方式与加工轮廓

选择技巧与禁忌：

1）多收集刀具产品样本。机夹式可转位车刀一般由专业厂家生产，用户主要是从其产品样本中进行选择，因此，平时收集的刀具产品样本越多，研读越多，则自身对刀具的认识就越深。

2）与当地的刀具经销商或代理商保持一定的联系与沟通，经常去看一些刀具实物，这对深刻认识刀具样本的介绍有很大帮助。

3）刀具选择应结合刀具样本，并确保所选刀具尽可能在当地可以购得，否则，一切都没有可操作性。

1.3.4　数控铣削刀具的结构与主要参数选择

1. 铣削刀具简述

数控铣刀是具有一个或多个刀齿的旋转刀具。数控铣刀的变化要远大于数控车刀，其分类的方式有多种。

（1）按用途不同　分圆柱形铣刀、面铣刀、立铣刀、三面刃铣刀、角度铣刀、锯片铣刀和 T 形槽铣刀等。数控加工用得较多的是面铣刀和立铣刀等。

（2）按齿背的加工方式不同　分为尖齿铣刀与铲齿铣刀两种。数控加工刀具基本以尖

齿铣刀为主。

（3）按铣刀结构不同　分为整体式、整体焊齿式、镶齿式和机夹可转位式。数控加工以机夹可转位铣刀与整体铣刀为主。

（4）按加工方式不同　数控铣床上除可进行常规的铣削加工外，还能进行钻孔、镗孔、攻螺纹等加工。因此，按加工方式分，除铣削加工刀具外，钻头（麻花钻为主）、镗刀、铰刀、丝锥等也是常用的铣削刀具。

2. 铣削刀具结构分析

图 1-25 列举了几种常用的数控铣削刀具以供参考。

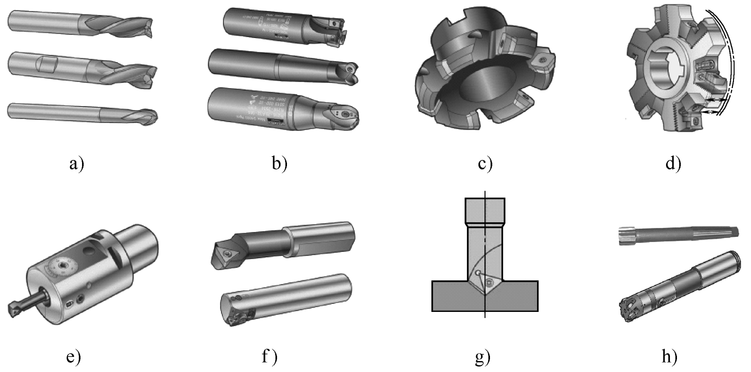


图 1-25　常用铣刀示例

a）整体式立铣刀　b）机夹式立铣刀　c）机夹式面铣刀　d）机夹式三面刃铣刀
e）可调镗刀　f）机夹式镗刀　g）倒角铣刀与定心钻　h）整体与机夹式机用铰刀

铣削刀具结构分析：

1）立式铣刀有整体式与机夹式两大类，实际生产中都有应用。

2）立式铣刀根据切削部分不同可分为圆柱立铣刀、圆锥立铣刀、圆角立铣刀（又称圆鼻刀）和球头立铣刀等。

3）整体圆柱式立式刀在切削刃数量上有一定的变化，如两刃的键槽铣刀、三刃及更多刃的立式铣刀。传统的三刃立式铣刀由于制作工艺的原因，端面中部往往不能切削，限制了这种刀具的应用，但近年来制作工艺的进步使得端面有一条切削刃延伸至中心，克服了端面不能下刀的缺陷。

4）整体圆柱式立式刀在螺旋角上也有一定的变化范围，较大的螺旋角相当于刃倾角增大，其切削较为省力，但制作工艺复杂，成本稍高。

5）面铣刀以机夹可转位式为主。

6）镗刀的形式有一定的变化，但其价格稍高，不可能完全配齐，因此各厂使用的镗刀结构与形式有一定的差异。

7）钻头以整体式结构的麻花钻应用较多，尺寸稍大时也可见机夹可转位式。

8）丝锥是定尺寸螺纹孔加工的主要刀具，但需注意数控加工可较方便地通过编程铣削螺纹孔，因此，必须关注螺纹铣削刀具。

9）铰刀是中、小定光孔精加工常用的定尺寸刀具，数控铣削一般采用机用铰刀，稍大尺寸的铰刀也有机夹式结构。

10）此外，还有一些特殊用途的刀具结构应该引起关注，如雕刻立铣刀一般多为单刃立铣刀。另外，还有倒角立铣刀、定心钻、三面刃铣刀、锯片铣刀等，这些刀具在数控铣削加工中也是可能用到的。数控车削加工的中心钻也常常用于孔加工之初钻中心孔。

3. 铣削刀具主要参数的选择

铣削刀具种类繁多，结构复杂，但也是有章可循的。铣刀多由专业厂家生产，因此用户以选用为主，铣削刀具选择时只需紧扣各种刀具的主要特征参数即可。图 1-26 列举了部分常用刀具及其主要特征参数供参考。

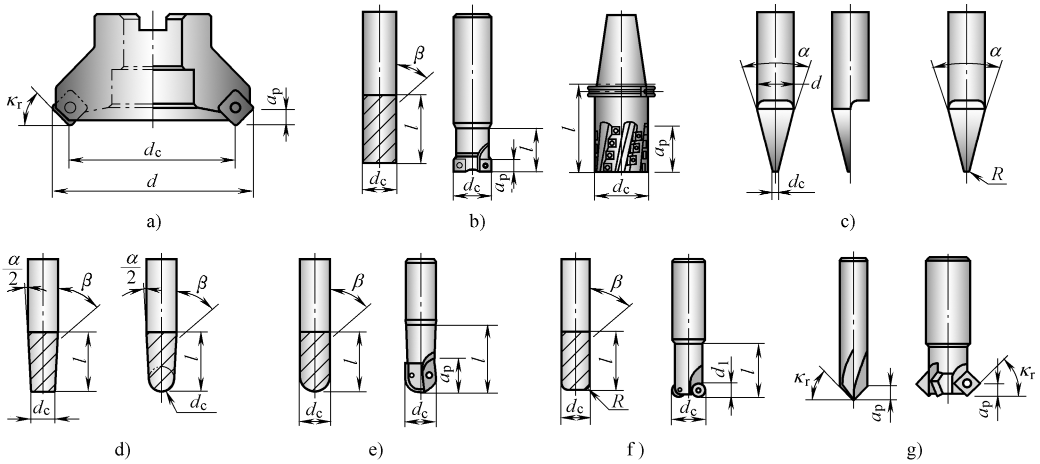


图 1-26　常用铣刀主要参数描述

a）面铣刀　b）圆柱立铣刀　c）雕刻刀　d）圆锥立铣刀及圆锥球头立铣刀

e）球头立铣刀　f）圆角立铣刀　g）倒角立铣刀

4. 铣削刀具与机床的联系

铣刀结构形式多样，而铣床主轴装夹部分却是固定的，这其中离不开过渡部分——刀柄。限于篇幅，这里不作介绍，有兴趣的读者可查阅相关刀具样本或参考资料[6][9][11][12][15]等，关注常见的 BT、JT、HSK 等刀柄的结构，并重点关注自己使用机床的刀柄结构与尺寸。

5. 铣削刀具与加工表面之间的关系

图 1-27 描述了铣刀与加工表面特征的关系，对铣刀结构的选择有一定的参考作用。图 a 所示为铣削，包括平面铣削（端铣和周铣）和曲面铣削；图 b 所示为孔加工，包括钻、铰、镗、锪、倒角、螺旋铣孔、插铣孔等；图 c 所示为螺纹铣削，包括攻螺纹和内、外螺纹铣削；图 d 所示为槽铣削示例。

6. 铣削刀具选择技巧

通过以上铣刀介绍，可以总结出以下几点选择技巧：

1）每种铣刀有其一定的应用范围。

2）三维曲面铣削加工以立式铣刀铣削为主，粗加工和半精加工可选择圆柱立铣刀或圆角立铣刀，精加工则以球头铣刀为主，曲率变化较小的曲面可考虑选用圆角立铣刀。

3）尽可能选用机夹可转位式铣刀。

4）铣刀的选择一定要考虑刀柄问题。刀柄的结构形式较多，而用户往往未配全各类刀

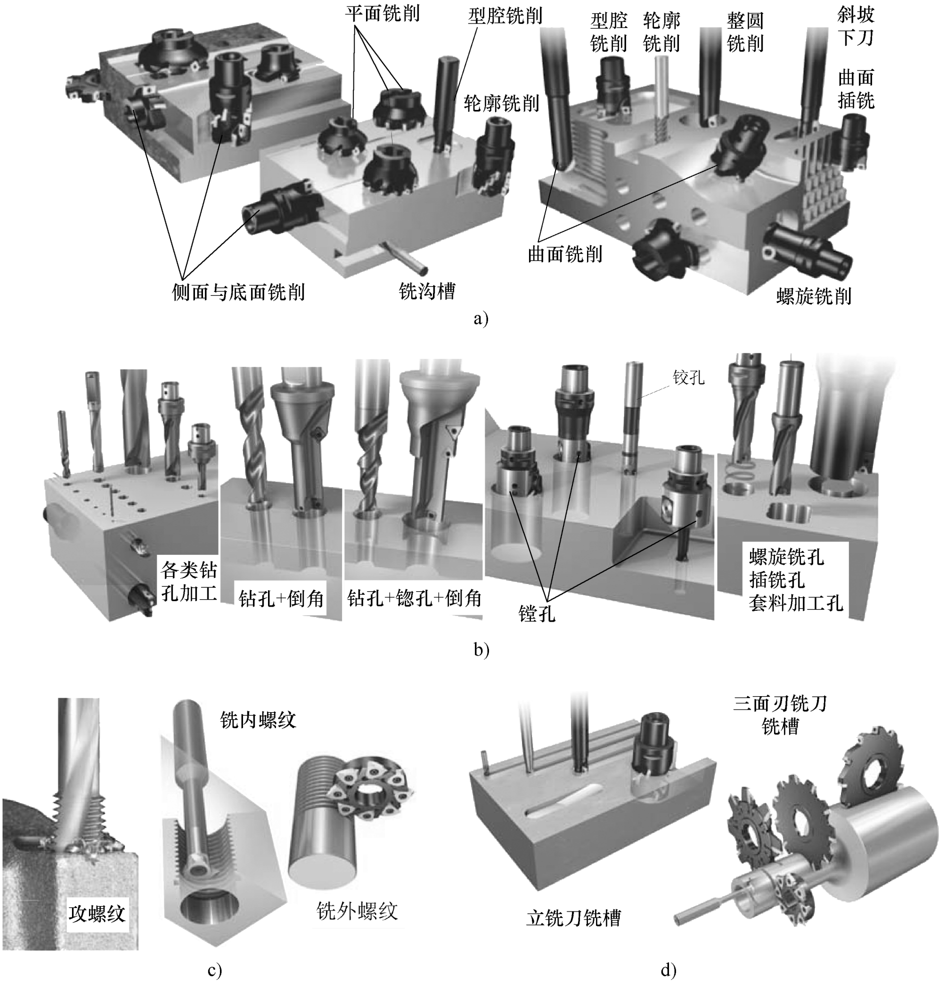


图 1-27 机夹可转位铣刀的类型

a）铣削 b）孔加工 c）螺纹加工 d）槽铣削加工

柄，因此选刀时一定要注意手头是否存在可用的刀柄，若没有是否需要购买，是否能够尽快买到。

5）三面刃铣刀与锯片铣刀虽然加工表面特征均表现为槽，但前者可以保证槽宽尺寸，而后者槽宽精度几乎不能保证。

6）平时多关注刀具样本，生产中多关注各种结构刀具的铣削特点与规律，多去刀具商店观察各类刀具。

1.3.5 切削用量的选择技巧

切削用量是切削时各运动参数的总称，包括切削速度（或转速）、进给量（或进给速度）和背吃刀量。实际选用时还必须考虑刀具寿命、加工经济性等问题。

1. 选择原则

切削用量的大小对加工质量、刀具磨损、切削功率和加工成本等均有显著影响。数控加

工中对切削用量的选择原则是：在保证加工质量和刀具寿命的前提下，充分发挥机床性能和刀具切削性能，使切削效率最高，加工成本最低。具体地说是：

1）粗加工时，首先选取尽可能大的背吃刀量；其次根据机床动力和刚性等的限制条件，选取尽可能大的进给量；最后根据刀具寿命确定最佳的切削速度。

2）精加工时，首先根据粗加工后的余量确定背吃刀量，尽可能一刀完成；其次根据已加工表面的粗糙度要求，选取较小的进给量；最后在保证刀具寿命的前提下，尽可能选取较高的切削速度。

2. 选择方法

（1）背吃刀量的选择　根据工件的加工余量，在留下精加工和半精加工余量后，在机床动力足够、工艺系统刚性好的情况下，粗加工应尽可能将剩余的余量一次切除，以减少进刀次数。如果工件余量过大或机床动力不足而不能将粗加工余量一次切除时，也应将第一、二次进给的背吃刀量尽可能取得大一些。另外，当冲击载荷较大（如断续切削）或工艺系统刚性较差时，应适当减小背吃刀量。

（2）进给量和进给速度的选择　进给量（或进给速度）是数控铣削加工中的重要加工参数，主要根据零件的加工精度和表面粗糙度要求以及刀具和工件材料来选择。粗加工时，对加工表面粗糙度要求不高，进给量（或进给速度）可以选择得大一些，以提高生产效率。而半精加工及精加工时，表面粗糙度值要求低，因此进给量（或进给速度）应选择得小一些。

最大进给速度受机床刚性和进给系统性能等限制。一般数控机床进给速度是连续可调的，并可在加工过程中通过机床操作面板上的进给速度倍率调节开关在一定范围内进行人工修调。

（3）切削速度的选择　切削速度对刀具寿命的影响最大，其选择时主要考虑刀具和工件材料以及切削加工的经济性。必须保证刀具的经济使用寿命，同时切削负荷不能超过机床的额定功率。在选择切削速度时还应考虑以下因素：

1）要注意避开积屑瘤的生成速度范围，精加工速度应该适当提高。

2）加工带硬皮的工件或断续切削的工件时，为减小冲击和热应力，应适当降低切削速度。

3）加工大件、细长件时，应适当降低切削速度，提高刀具寿命，保证一刀能够将工件表面加工完成，避免中途换刀。

数控加工常用转速来表示切削速度的大小，切削速度和主轴转速的关系如下：

$$n = \frac{1000v}{\pi d}$$

式中　n——主轴转速，单位为 r/min；

v——切削速度，约等于切削点处的线速度，单位为 m/min；

d——工件直径（一般取最大切削直径），单位为 mm。

从上式可见，在保证切削速度不变的情况下，直径越大转速越低，直径越小转速越高。这一点在数控加工过程中应该引起注意，有时虽然转速较低，但切削速度并不一定低。而在数控车削加工时，当切削直径较小时（如切断或车端面等）又会出现转速偏高的问题。当然，数控车削系统对这个问题已经有所考虑，即在采用恒线速度切削时（G96），一般配合

采用 G50 S_指令钳制最大转速。

3. 切削用量选择技巧

切削用量的选择是一个经验性较强的工作，影响因素很多，各人的经验和习惯也不同，要想使用好切削用量必须经过一段时间的学习、思考和观察才会有所收获。这里提出几点建议供参考：

1）手头必须有几本较实用的机械制造工艺手册，这上面会列举大量切削用量的图表和相关知识，这是前人知识与经验的总结，值得研读。

2）多向有经验的老同志学习，包括阅历丰富的工程技术人员和工人师傅。老同志的经验有很多是书本上没有，或是不好表达的东西。

3）多观察。经常深入现场观察加工过程，包括自己选择的切削用量的使用情况以及他人选择的切削用量的情况，并从现场的加工情况判断切削用量的使用合理性。观察的过程就是学习、研究和提高的过程。

4）多收集一些有价值的刀具样本。刀具样本往往有比书本上先进实用的内容，特别是样本上推荐的切削用量，针对性较强。

应该认识到，切削用量的选择只有合理与不合理之分，一般不存在对与错的概念；其次，切削用量的选择是一个模糊的、经验型的东西，不同的人选出来的数值可能会有差异，这是正常的；第三，选择和确定下来的切削用量不是一成不变的，必须根据现场实际情况进行修正，特别是初次使用的切削用量。

1.4 如何学好数控加工编程技术

如何学好数控加工编程技术，是数控加工人员经常思考的问题。关于这一点，笔者有如下体会：

1. 明确数控系统与数控机床

数控机床的工作过程是依赖于一定的编程指令进行的。数控机床的核心是数控系统，每一种数控系统均有自己的数控指令集，不同的数控系统，其数控指令集存在一定的差异，甚至相差较大。即使是同一品牌的数控系统，不同时期的产品也有一定的差异。另外，不同厂家的数控机床，由于其设计理念、功能用途各有特色，因此，在设计上也略有差异，最明显的表现是数控机床操作面板的布置形式有较大的差异，如有的是按键，而有的是波段旋钮。同时，数控车床与数控铣床或加工中心由于其自身的加工特点与形式，其数控系统也是有差异的。因此，学习数控加工编程技术离不开具体的数控机床（含数控系统）。

2. 加强相关基础知识的学习

数控加工技术常常被称为新型或现代的机械加工技术，实际上，其核心仍然是机械制造技术，这一点不能忘记。同时数控加工技术的内容通常认为是数控技术理论、数控加工编程技术与数控维修技术的综合。作为学习数控编程的人员，必须掌握数控加工的基本原理和基本的数控维修技术，这对使用好数控加工编程技术是很有帮助的。因此，笔者认为，学习数控加工编程技术不能孤立，必须注意加强相关基础知识的学习，具体表现为：

1）数控加工编程技术的基础是机械制造技术，机械制造技术的基础理论包括金属切削原理与切削刀具知识，因此，学习数控加工编程技术的人员必须加强切削加工原理知识的学

习，特别是涉及有关切削用量选择与调整方面的知识。其次，数控加工离不开切削刀具，数控加工编程不考虑刀具的选择也无法实施，实际中常常见到选择很小直径的铣刀进行型面铣削精加工的情况，实际上，由于刀具的强度与刚性问题，根本无法完成实际切削加工。实际中由于刀具选择不当导致编程失败的情况比比皆是。

2）学习数控加工编程的人员必须了解数控机床的基本工作原理、插补原理等基础知识。

3）数控机床是一个集机-电-液技术为一体的机床实体，要想了解数控机床的工作原理，离不开机电控制技术和必要的液压与气动技术。

4）数控机床维修技术是实际生产中不可或缺的技术。虽然可能有专业的维修人员承担这项工作，但当数控机床出现问题时，你首先能大致判断问题出在哪里、问题的大小如何、自己能否解决，有时出现的问题根本不需要维修人员解决，如数控系统电池电压过低、机床润滑油面太低等基本故障。

另外，机床参数的设置对高效、合理使用机床帮助很大。机床参数一般由专业人员修改，但与加工有关的参数则无法由他人设置。

以上谈到的问题仅仅是抛砖引玉，相关基础知识的学习还与个人的基础知识有关，具体要学习哪些相关知识离不开自己的思考。

3. 重视数控机床的操作

严格地说，数控加工编程技术离不开数控机床操作，且数控加工编程中很多指令是与机床操作有关的。例如最基本的工件坐标系的设定，如果没有机床操作方面的知识，对这类指令是很难理解深刻的；另外，机床暂停指令 M00 与选择性暂停指令 M01 在机床上是如何实现的，有过机床操作经验的人，对这个指令就会有深刻的理解，在程序中使用也就得心应手了。建议数控加工编程技术人员经常到生产现场，多观察，多体会，这是提高数控加工编程水平的一个重要环节。

4. 注意处理手工编程与自动编程的关系

数控加工编程方法主要有两种——手工编程与自动编程。前者多指手工计算图样上的相关点坐标或仅借助于简单的计算器，通过手工编写加工指令完成数控程序的编制；而后者主要指借助于专业的编程软件，通过计算机交互设置，自动生成加工程序完成程序编制的过程。

手工编程是基础，应该掌握，在一些简单零件的编程方面，特别是应用各数控系统特有的固定循环指令编程方面，自动编程往往显得力不从心。另外，某些宏程序编制自动编程目前还不能解决，因此不要有了自动编程技术就抛弃手工编程技术。自动编程生成的加工程序，如果没有手工编程的基础，也无法阅读与修改。

自动编程技术是随着计算机技术的发展而普及的，近年来，已成为实际生产中广泛应用的编程方法，从事数控加工编程的人员必须掌握。学习自动编程技术必须要有一定的计算机操作能力，选择一款合适的编程软件入门学习，再根据实际需要与编程软件的不断发展进行调整。同时应该注意，自动编程生成的数控程序格式相对固定，如何通过少量的修改获得符合自己要求的加工程序是必须掌握的技能。

总之，手工编程与自动编程技术是相辅相成的，两者不可偏废，才能成为一名优秀的数控加工编程人员。

5. 关注数控加工编程新技术发展

数控加工编程技术进展迅速，其发展速度远大于传统的机械加工技术。因此，数控加工技术人员必须不断关注其发展动态。

数控加工编程技术的发展，在很多编程软件上可以体现，如新版本的编程软件，往往较旧版本的软件加入了很多新的加工方法。近年来，大多数编程软件加入了高速加工刀具轨迹编程功能就是一个例证。

另外，不断出现的许多新型数控系统会增加一些新指令，若不能充分利用，则无法提高自己的编程水平。

第 2 章　数控车床加工编程技巧与禁忌

2.1　数控车床编程必备基础

1. 数控车床简介

数控车床是一种以加工回转体为主的切削机床，其运动控制轴一般为两轴。以应用广泛的卧式数控车床为例，其控制轴一般为 X 轴和 Z 轴。按照 GB/T 19660—2005 的规定，Z 轴应该是平行于机床主轴的方向，其正方向是从工件到尾架的方向；而 X 轴应该是径向且平行于横刀架，其正方向是离开旋转轴的方向。另外，卧式数控车床的布置形式有平床身前置刀架与斜床身后置刀架两种，简称前置刀架与后置刀架，如图 2-1 所示。

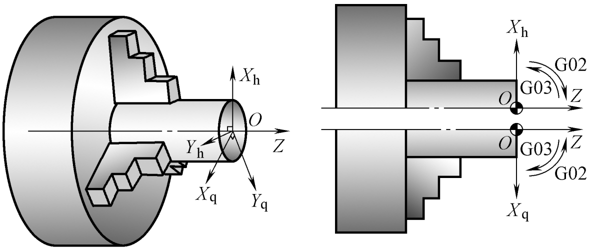
a)　　　　b)

图 2-1　卧式数控车床

a）平床身前置刀架　b）斜床身后置刀架

基于前置刀架与后置刀架车床结构，其工件坐标系的表述也有两种，如图 2-2 所示。图中所示为工件坐标系定义在工件前端面（即右端面）时前、后置的三维立体图与平面展开图，图中脚标 q 表示前置刀架，脚标 h 表示后置刀架。在图 2-2a 所示的三维立体图中还标记出相对应的 Y 轴，这对于理解前、后置刀架编程时顺圆与逆圆方向非常有帮助。

图 2-2b 所示为工件坐标系平面展开图。如果按照图 1-10 所示顺、逆圆插补方向的判断规则来看，平面展开图中似乎相反的方向实际上是一致的，且由于斜床身后置刀架更适合自动化程度较高的数控车床排屑的需要，应用更广泛。同时，后置刀架顺圆与逆圆方向表达符合顺时针与



a)　　　　b)

图 2-2　数控车床工件坐标系

a）三维立体图　b）平面展开图

逆时针方向，因此，大部分数控类图书采用后置刀架进行讲解，本书也基本遵循这一规律。

学习与应用技巧：

1）前、后置刀架数控车床虽然坐标系的平面表示不同，但其程序是完全通用的。

2）由于前、后置刀架数控车床坐标系表达的差异性，实际车床中关于机床参考点的位置表述就会略有差异，如对于前置刀架而言在右下角，而对于后置刀架而言是在右上角，但其均是 *X* 轴和 *Z* 轴正方向的最大位置处。

2. 数控车床程序段特点与应用技巧

数控车床加工程序的结构特点仍然遵循 1.2.1 节中的表述，但其程序段结构上有其自身的规律。卧式数控车床程序段的结构如下：

$$\text{N_ G_ X(U)_ Z(W)_} \begin{Bmatrix} \text{I_ K_} \\ \text{R_} \end{Bmatrix} \text{T_ F_ S_ M_;}$$

其中，N_是程序段顺序号（任选项），可取 N0000 ~ N9999（前 0 可省略），或不写。

G_是准备功能指令，可取 G00 ~ G99。

X_、Z_是尺寸字，即刀具沿相应坐标轴位移终点坐标的绝对值，为续效字。

U_、W_是尺寸字，即刀具沿相应坐标轴位移终点坐标的增量值，为续效字。

I_、K_ /R_是圆弧插补时圆心相对于圆弧起点的坐标/圆弧半径值，非续效字。

T_是刀具指令，指定刀具号与刀补号。

F_是进给速度指令。

S_是主轴转速指令。

M_是辅助功能指令。

；是程序段结束符。

应用技巧与禁忌：

1）程序段一般由程序段顺序号字，以及各种功能字、尺寸字和程序段结束符（；）等组成。

2）一个程序段由一组开头是英文字母、后面是数字组成的信息单元“字”组成，每个字前面的字母称为地址符，用于识别地址。

3）程序段顺序号用 N 后跟一个不超过 4 位的数值（1 ~ 9999）组成。一般情况下，顺序号可以任意指定，甚至可以没有顺序号。但要注意，特殊情况下必须写，如固定循环指令、宏程序中的某些程序段等。

4）数控车削系统坐标值的绝对坐标与增量坐标编程的表示方法与数控铣床不同，使用地址符 X_Z_和 U_ W_区分，程序段内允许混合编程。

5）程序段是可作为一个单位来处理的、连续的字组，包含一组操作，是数控加工程序中的一条语句。

6）注意坐标尺寸字 X（U）_和 Z（W）_为续效字，后续程序段未发生改变的可以不写。而圆心坐标和圆弧半径参数 I_、K_ 和 R_为非续效字，每一个程序段都必须书写，否则可能出现意想不到的结果。

7）数控车削系统刀具偏置（补偿）号是由 T 指令指定与调用的。

8）程序段结束符“;”的分号是英文分号，因此，在计算机上书写程序时必须切换为英文输入方式键入，禁止键入中文状态下的分号。

9）数控车削的程序段仍采用字地址可变程序段格式，每个字长不固定，各个程序段中的长度和功能字的个数都是可变的。

10）地址可变程序段格式中，在上一程序段中写明的、本程序段里又不变化且仍然有效的字，可以不再重写。这种功能字称为续效字。

11）虽然字地址可变程序段格式中对各个字的书写顺序无要求，但为了书写、输入、检查和校对的方便，各功能字在程序段中的位置习惯仍按以上的顺序排列。

3. 数控车床直径编程、半径编程与使用技巧

数控车床加工的零件一般为回转体，图样上多以直径表示。当然，切削槽深等还是以深度（半径）表示居多，如图 2-3 所示。为此，数控车削系统的 *X* 轴尺寸被设计成直径或半径编程方式。

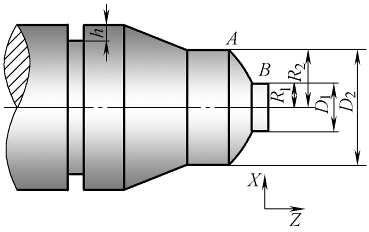


图 2-3　直径编程与半径编程

使用技巧与注意事项：

1）系统参数 No. 1006#3（DIA_x）用于设定直径编程或半径编程，默认设置为直径编程（$DIA_x=1$）。

2）*Z* 轴坐标与直径编程还是半径编程无关。

3）直径编程时，*X* 轴增量指令 U_也用直径值指定。如图 2-3 所示，刀具轨迹 *B* 到 *A* 的增量坐标值为（D_2-D_1），径向槽深用 $-2h$ 指定。

4）坐标系设定指令 G50 用直径值指定坐标值。

5）刀偏值分量由参数 No. 5004#1（ORC）设定直径或半径指定，一般设置为直径指定（ORC＝0）。

6）固定循环参数，如沿 *X* 轴切深（R）用半径值指定。

7）圆弧插补指令中的圆心坐标参数（R 和 I 等）用半径值指定。

8）数控系统坐标位置显示画面中的轴位置显示按直径值显示。

9）若有数台数控车床，最好设置成一致，如直径编程，以便程序可以通用。

4. 数控车床的绝对坐标编程、增量坐标编程与混合编程

数控车床刀具移动量的指定方法有绝对坐标编程与增量坐标编程两种。当用 G 指令系统 *A* 时，绝对坐标和增量坐标编程的指令地址字分别用 X_ Z_和 U_ W_表示。绝对坐标编程时，用刀具运动终点位置的绝对坐标值编程。增量值坐标编程时，用刀具各轴移动的距离编程。数控车削系统的坐标指定允许混合编程，即 *X* 轴和 *Z* 轴可以在同一个程序段中用绝对或增量坐标编程。以图 2-4 为例，欲加工零件的 *AB* 段，已知 *A*（200，450）和 *B*（400，50）坐标，进给速度为 100mm/min，其加工指令程序如下：

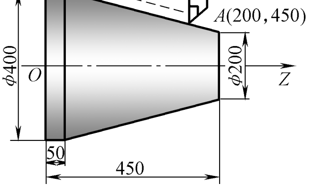


图 2-4　绝对/增量/混合坐标编程图例

绝对值指令编程：　G01 X400.0 Z50.0 F100；

增量值指令编程：　G01 U200.0 W-400.0 F100；

混合坐标值指令编程：　G01 X400.0 W-400.0 F100；或 G01 U200.0 Z50.0 F100；

使用技巧与注意事项：

1）数控车床编程的绝对坐标与增量坐标指定不能用 G90/G91 指定。

2）结合图样上尺寸标注特点，合理使用混合编程对于手工编程意义明显。

2.2 主轴速度和进给轴速度控制与应用分析

数控车床的主轴是带动工件旋转的主运动轴，它提供切削加工的主运动。虽然金属切削原理中的主运动多用线速度（m/s）表示，但数控车削加工仍广泛的采用主轴转速（r/min）的表示方法，且线速度也多以 m/min 为单位。

进给速度是指切削加工时刀具的移动速度，其单位有 mm/min 和 mm/r 两种。

2.2.1 主轴速度控制与应用

1. 主轴速度指令与控制

现代数控机床多采用地址符 S 指定主轴速度，其指令格式为：

G96/G97 S_;

其中，G96/G97 是主轴速度控制指令，其含义如图 2-5 所示。在 FANUC 公司的原厂说明书中表述为“恒表面速度控制”和“恒表面速度控制取消”，实际上就是我们常说的恒线速控制与恒转速控制。该指令用于指定 S_指令中的数值单位，恒线速度的单位为 m/min，而恒转速的单位为 r/min。

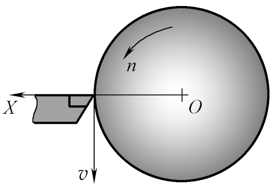


图 2-5 G96/G97 指令

主轴速度控制指令应用示例如下：

G96 S50；表示 S 指令指定的工件表面刀位点处的线速度为 50m/min。

G97 S800；表示 S 指令指定的主轴转速为 800r/min。

2. 恒线速控制主轴最大转速钳制

注意到车床主轴转速与线速度的关系为 $n=\dfrac{1000v}{\pi d}$，它清晰地表示出主轴转速 n 与线速度 v 及工件切削点直径 d 有关。在切削速度 v 一定的情况下，随着加工直径的减小，主轴转速是增加的，这在切断加工与车端面加工时可能出现速度无限增加的情况，显然，实际生产中是不允许的。为此，数控系统设计了一个最大主轴转速钳制指令，其指令格式为：

G50 S_ ;

其中，S_为指令恒线速度控制时允许的最高主轴转速，单位是 r/min。

在指令恒线速度控制时，必须在主轴速度指令段之前增加主轴转速钳制指令 G50 S_，才可有效避免主轴转速无限增加的问题。

以图 2-6 所示的车端面加工为例，当刀具运行到 ϕ21.231mm 时，主轴转速已达到 1500r/min，这时即使刀具继续朝中心进给，由于 N40 程序段 G50 S1500 的钳制，主轴转速不会继续增加。

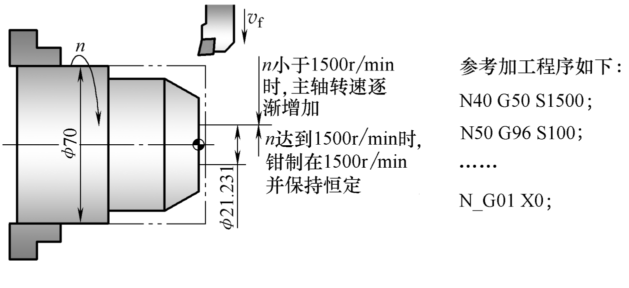


图 2-6 G50 指令钳制主轴转速

3. 主轴速度控制指令应用技巧与禁忌

1）G96 与 G97 指令是同组的模态指令。

2）数控车削系统默认设置为恒转速控制 G97，它较为符合一般习惯。

3）恒线速度控制指令加工过程中的切削速度恒定，因此，加工表面的粗糙度较为均匀，适合于精加工。而恒转速控制加工过程较为稳定，粗加工时效果较好。

4）系统参数 No. 3771 和 No. 3772 可以钳制恒线速度控制时主轴的最低转速与最高转速。因此，建议速度钳制指令中的最大主轴钳制速度不超过参数 No. 3772 的设置值，否则无意义。

5）恒线速度控制指令 G96 与速度钳制控制指令 G50 S_宜配套使用，如图 2-6 中的参考程序所示，并且养成这样写程序的习惯，防止意外事件的发生。尽量不要单独使用恒线速度控制指令。

7）在程序中出现主轴起动指令 M03 或 M04 之前，G96 指令程序段中的 S 指令值被当做 S = 0 处理，即主轴不会旋转。

8）G96 与 G97 指令指定主轴速度控制转换过程的两个程序段之间必须至少指定一个其他指令的程序段。

9）恒线速度控制对螺纹切削有效，因此螺纹加工，特别是车削圆锥螺纹与端面（涡形）螺纹时必须用 G97 指令指定为恒转速控制，严禁恒线速度控制加工螺纹。

10）快速移动指令 G00 程序段，恒线速度控制是以程序段终点坐标值计算得到的主轴速度控制的。

2.2.2 进给轴速度控制与应用

进给轴速度控制刀具移动，包括快速定位移动 G00 与切削进给移动 G01/G02/G03。

1. 快速定位移动的速度控制

快速定位移动主要用于非切削加工刀具的移动，目的是尽量缩短辅助时间。其移动速度的控制有以下特点：

1）各轴的移动速度由系统参数 No. 1420 设置固定，程序中无法指定。

2）快速移动速度可由机床操作面板上的倍率调节开关 F0 、 25% 、 50% 和 100% 进行调节。其中 F0 的速度由参数 No. 1421 设置，一般参数 No. 1421 的设定值小于参数 No. 1420 中的设定值。

3）快速移动指令移动至终点坐标时一般均要执行“到位”检查，到位检查精度由参数 No. 1826 设定，“到位”检查时先减速，再检查进入到位精度后转入执行下一个程序段。

2. 切削进给移动的速度控制

切削进给移动速度控制指直线插补 G01 与圆弧插补 G02/G03 等指令中由进给速度控制指令 F_指定的移动速度控制。切削进给移动的速度控制有以下特点：

1）数控车削的进给速度控制有两种，即每分钟进给和每转进给，分别由指令 G98 和 G99 指定，其对应的速度单位为 mm/min 和 mm/r。

2）G98/G99 为同组的模态指令，可以相互注销，其中每转进给 G99 为系统开机默认指令。

3）数控车削系统切削进给时一般亦执行“到位”检查，其到位检查精度一般设置为：下一个程序段为切削进给时，执行参数 No. 1827 的设定值（其一般小于 No. 1826 的设定

值)。若下一个程序段非切削进给，则与 G00 指令的到位检查精度相同。

4）切削进给移动速度的方向控制是，直线插补时为直线方向，圆弧插补时为当前刀位点的切线方向，如图 2-7 所示。

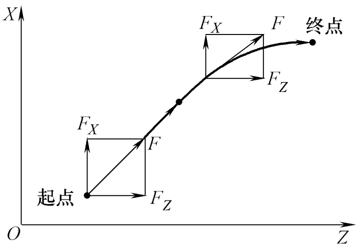


图 2-7 切削进给速度方向

5）切削进给移动速度可以用机床操作面板上的进给倍率调节开关在一定范围内进行调节。

6）数控车削状态下，主轴转速较低时会造成进给速度不稳定，且主轴转速越低，进给速度的波动越频繁。

7）最大钳制进给速度可由参数 No. 1422 设定，若实际切削时的进给速度（如用进给倍率调节时）超过该值时，即可被钳制在该速度上。

3. 进给轴速度控制应用技巧与禁忌

1）快速定位移动主要用于非切削加工的刀具移动，而切削进给移动主要用于切削加工。

2）严禁 G00 指令用于切削加工。

3）进给轴移动速度的控制均实行加/减速运动方式，但两者加/减速运动曲线不同，如图 2-8 所示，快速移动为恒加速/恒减速的直线型，而切削进给移动一般为指数型（图 b）或铃型（图 c）。可见进给移动的速度变化更为平稳。图中，F_R和 F_C分别为快速移动与进给切削刀具移动速度，T_R和 T_C分别为快速移动与进给切削速度的加/减速时间常数。

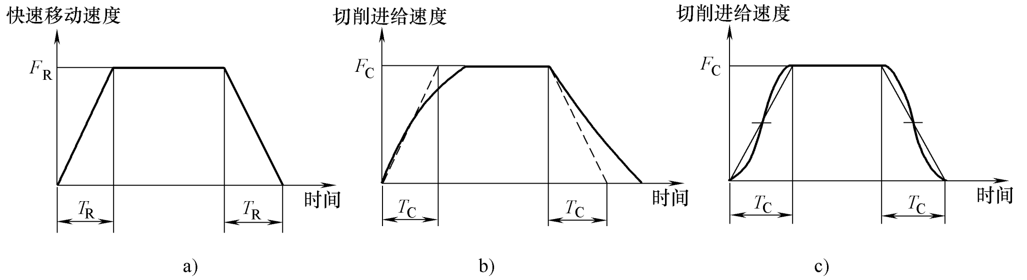


图 2-8 进给轴速度控制时的加/减速曲线

a）快速定位移动 b）、c）切削进给移动

4）切削进给移动在运动方向发生变化时，会产生圆角轨迹，如图 2-9 所示，但进给速度较低时影响不明显，若要求较高时可考虑加入暂停指令 G04。

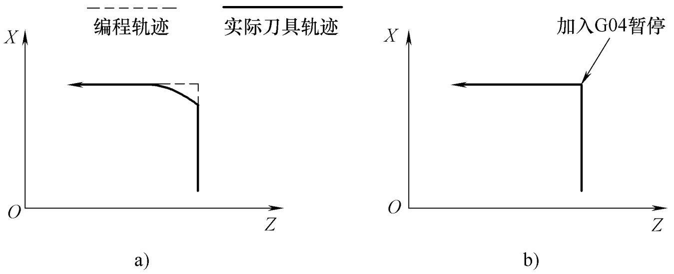


图 2-9 两程序段过渡轨迹分析

a）未加 G04 暂停 b）加入 G04 暂停后

注：图 2-9a 所示的过渡轨迹，在数控铣削系统切削进给方式（G64 方式，是系统的开机默认方式）时也可能出现，除用 G04 暂停外，还可以用准确停止指令 G61 或 G09 控制。

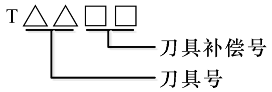
5）由于进给倍率调节范围的下限范围较大，因此数控编程时的进给速度一般取得偏大，以便实际中调整的空间更大。螺纹切削加工时进给倍率调节无效。

2.3　刀具功能指令 T 与动作分析

刀具功能指令 T 主要用于刀具选择与调用，数控车削系统还可实现刀补值的调用。T 指令还可用于刀具寿命管理，但应用不多。

2.3.1　刀具功能指令 T 的格式

刀具功能指令常用地址符 T 加后面 4 位数字组成，即通称的 T（2 +2）格式，指令格式如下：



刀具指令中的后 4 位数字中，前两位△△是刀具号，后两位□□是刀具补偿号（又称偏置号）。同一把刀具可以调用不同的补偿号。一般来说刀具补偿存储器的数量远大于刀具数，如 FANUC 0i Mate-TC 系统的刀具补偿存储器就有 64 个。当刀具号为 00 时，不选择刀具。当刀具补偿号为 00 时，系统规定其补偿值为 0，相当于取消刀具补偿。

应用技巧：

1）一个程序段只能有一个 T 指令。

2）系统参数 No. 5002#0（LD1）用于设置 T 指令中的后一位还是后两位指定刀具补偿号。默认设置为后两位指定（LD1 =0），即上述的 T（2 +2）格式。

3）当移动指令与 T 指令在同一程序段指定时，可由参数 No. 5002#6（LWM）设置为与 T 指令同时执行移动或移动指令执行后执行 T 指令。一般设置为同时执行（LWM =1，与 T 指令同时执行移动）。

2.3.2　刀具补偿（偏置）

在数控加工中，刀具“补偿”与“偏置”的实质是一样的，只是叫法不同，可认为是一个问题的两种表述，读者不必追究其差异性。FANUC 0i 数控系统的偏置画面中称为“偏置”，而实际中常常又叫“补偿”。若要过于追究的话，可参考 FANUC 官方手册的说法，即实现刀具位置移动的叫“偏置”，而修正刀具半径偏差的叫“补偿”。

现代数控系统一般将刀具偏置分为外形偏置与磨损偏置两部分管理。图 2-10 所示为 FANUC 0i Mate-TC 数控系统的偏置画面。在偏置画面中，可看到 5 列数据，分别为偏置号 No. × × 、偏置 X、偏置 Z、刀尖圆弧半径 R 和理论刀尖方位号 T，其中，X 和 Z 称为刀具位置偏置，R 和 T 称为刀尖圆弧半径补偿。偏置号前的 G（见图 2-10a）为英文单词 Geometry（几何）的第一个字母，所以外形偏置画面常常称为几何偏置；而偏置号前的 W 为英文单词 Wear（磨损）的第一个字母，即图 2-10b 所示为磨损偏置画面。

外形偏置一般控制刀具安装偏差或形状偏差，其数值较大；而磨损偏置多用于刀具磨损

偏置/外形 O0033 N00010

NO.	X	Z	R	T
G 01	0.000	0.000	0.000	0
G 02	0.000	0.000	0.000	0
G 03	-368.274	-793.249	0.400	2
G 04	0.000	0.000	0.000	0
G 05	0.000	0.000	0.000	0
G 06	0.000	0.000	0.000	0
G 07	0.000	0.000	0.000	0
G 08	0.000	0.000	0.000	0

实际位置（相对坐标）
U -315.678 W -624.904

)_ S 0 T0300
MDI **** *** *** 14:45:42
〔 磨损 〕〔 外形 〕〔 〕〔 〕〔（操作）〕

a)

偏置/磨损 O0033 N00010

NO.	X	Z	R	T
W 01	0.000	0.000	0.000	0
W 02	0.000	0.000	0.000	0
W 03	0.000	0.000	0.000	0
W 04	0.000	0.000	0.000	0
W 05	0.000	0.000	0.000	0
W 06	0.000	0.000	0.000	0
W 07	0.000	0.000	0.000	0
W 08	0.000	0.000	0.000	0

实际位置（相对坐标）
U -315.678 W -624.904

)_ S 0 T0300
MDI **** *** *** 14:45:21
〔 磨损 〕〔 外形 〕〔 〕〔 〕〔（操作）〕

b)

图 2-10 刀具偏置画面

a）外形偏置画面 b）磨损偏置画面

的补偿以及加工尺寸的微调，其数值较小。刀具的实际偏置等于外形偏置与磨损偏置两部分的代数和。另外，外形偏置还常常用于建立工件坐标系。

偏置轨迹分析时常用到偏置矢量的概念，所谓偏置矢量实际上是偏置存储器中 X 和 Z 两偏置分矢量（带符号的偏置分量）的合成矢量。

应用技巧与禁忌：

1）系统参数 No. 5002#1（LGN）用于设置刀具的外形偏置号与磨损偏置号是否相同，默认设置为相同（LGN =0）。

2）系统参数 No. 5002#2（LWT）用于设置刀具磨损补偿是用刀具移动实现还是用坐标系偏移实现，默认设置为用刀具移动进行补偿（LWT =0），其补偿动作的实现必须在刀具直线移动程序段进行。

3）系统参数 No. 5002#4（LGT）用于设置刀具外形补偿是用刀具移动实现还是用坐标系偏移实现，默认设置为用坐标系偏移进行补偿（LGT =0），此时与 LWM 设置无关，在 T 指令程序段补偿。其偏置动作的实现通过坐标系的移动实现。此时刀具一般不动，仅是坐标值发生变化（即坐标系产生了移动）。

4）系统参数 No. 5002#5（LGC）用于设置 00 偏置号时是否取消刀具外形补偿，LGC =0 时为不取消（LGC =0）。

5）系统参数 No. 5003#6（LVC）用于设置按下 复位 键时是否取消偏置量，LVC =0 时为不取消偏置量。

2.3.3 刀具偏置的动作分析

1. 坐标系偏移实现刀具偏置

通过坐标系偏移进行刀具偏置是基于偏置矢量移动坐标系实现偏置控制刀具移动的，常用于实现外形偏置。图 2-11 所示为通过坐标系偏移进行偏置。图中 *A* 点用刀具指令调用刀具外形偏置，但刀具不动，仅是坐标系偏移，执行下一个程序段 *AB* 后，终点坐标是按偏移后的坐标系 $X'O'Z'$ 计算，故刀位点实际移动至 B' 点，*C* 点为刀具补偿号为 00 的程序段，当 LGC =0 时，刀具移动至 C' 点，且坐标值为坐标系 $X'O'Z'$ 中的坐标，即使 LGC =1，刀位点仍在 C' 点，只是坐标值转为坐标系 *XOZ* 中的坐标。

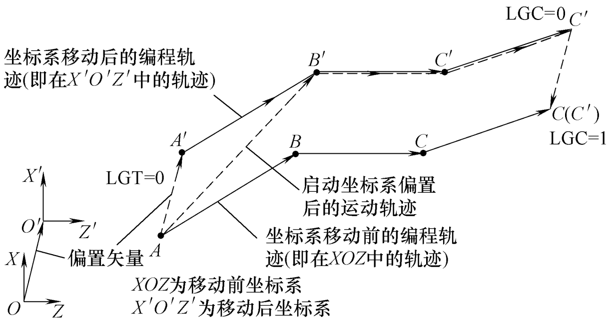


图 2-11　坐标系偏移实现偏置

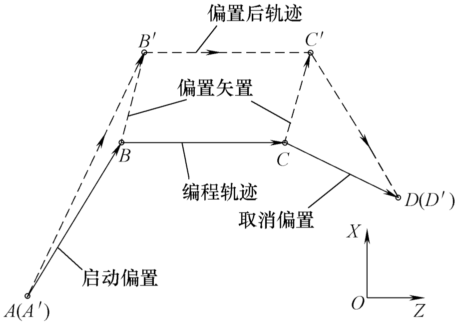


图 2-12　刀具移动实现补偿

应用技巧与禁忌：

1）刀具外形偏置实现后，刀位点的实际位置等于编程坐标矢量与偏置矢量的矢量和。分量坐标为相应编程坐标与其分矢量的代数和。

2）图 2-11 动作分析。移动坐标系但刀具不动；计算第一个程序段终点 B' 的坐标（编程坐标与偏置矢量的矢量和）；刀具按偏置后的终点坐标直线移动，图中轨迹 AB' 完成启动偏置，后续每一个程序终点均按偏置后的坐标系确定并实现刀具移动。

2. 刀具移动实现刀具补偿

通过刀具移动进行刀具补偿，常用于实现刀具磨损补偿。图 2-12 所示为通过刀具移动进行刀具补偿。图中 A 点调用刀具磨损补偿，B' 点是 B 点坐标加上编程矢量后获得的点，即刀具补偿是通过 AB 段的刀具移动实现的。同理，若 C 点用 00 偏置号取消刀具补偿，则接着的移动段 CD 的 D 点就返回到没有刀具补偿的 D 点。

应用技巧与禁忌：

1）刀具磨损补偿后，刀位点的实际位置等于编程坐标矢量与偏置矢量的矢量和。分量坐标为相应编程坐标与其分矢量的代数和。

2）图 2-12 动作分析。在直线段 AB 启动磨损补偿，计算终点坐标 B'（编程点坐标 B 加上磨损矢量）；刀具按补偿后的终点坐标移动（轨迹 AB'），完成磨损补偿；后续每一个程序终点均按补偿后的坐标点确定并实现刀具移动。取消磨损补偿后的动作正好相反（图中 CD 段）。

3. 坐标系偏移与刀具移动实现刀具偏置（补偿）

数控车削系统一般设置为用一个刀具偏置号同时调用刀具外形偏置与磨损补偿（LGN = 0）。这时刀具移动到达的程序段终点坐标实际上是刀具外形偏置矢量与磨损偏置矢量的矢量和，其 X 轴和 Z 轴的分矢量是相应外形与磨损偏置分矢量的矢量和，当然也等于其代数和。图 2-13 所示为通过坐标系偏移与刀具移动实现刀具补偿。图中矢量 $\boldsymbol{G}$（$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{G}_X+\boldsymbol{G}_Z$）为外形偏置，通过坐标系偏移实现偏置，矢量 $\boldsymbol{W}$（$\boldsymbol{W}=$

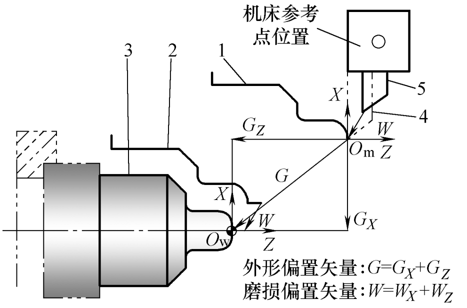


图 2-13　坐标移动与刀具移动偏置（补偿）轨迹分析

1—编程轨迹　2—刀具磨损且未进行刀具磨损补偿的轨迹

3—刀具未磨损或磨损后并进行刀具磨损补偿后的轨迹

4—磨损前刀具轮廓　5—磨损后刀具轮廓

$W_X + W_Z$，图中未示出其分矢量）为磨损补偿，通过刀具移动实现补偿。

4. 应用技巧与禁忌

1）刀具外形偏置又称几何偏置，一般设置为坐标系偏移实现，可用于工件坐标系的建立、非基准刀的位置偏差补偿等。

2）刀具磨损补偿一般设置为刀具移动实现，顾名思义，它用于刀具磨损后的补偿，实际中还广泛用于加工尺寸的微调控制。

3）刀具偏置（补偿）一般包括启动偏置、偏置保持运动和取消偏置三个步骤，其中启动与取消偏置必须在直线段中进行，禁止用于圆弧段。

4）刀具总的偏置量等于外形偏置与磨损偏置的代数和。

5）由于刀具指令具有启动与取消刀具偏置功能，所以，编程时启动偏置指令与取消偏置指令一般成对出现，且尽可能不与刀具移动指令同程序段书写。

2.4 数控车床的坐标系及其建立

坐标系是数控加工过程中确定刀位点与刀具移动的基础，必须认真研读与理解。

2.4.1 数控车床坐标系的概念

在第1章中已初步介绍过坐标系的概念，这里以数控车床为例进行分析。

数控车床坐标系的确定仍然遵循 GB/T 19660 的右手定则，具体如图2-14所示。图中，$O_{机}$为机床坐标系原点（简称机床原点），O_m为机床参考点，O_w为工件坐标系原点。其中，以机床原点$O_{机}$为基准建立的坐标系称为机床坐标系，而以O_w为原点建立的坐标系称为加工坐标系或工件坐标系。当然，以O_m为原点建立的坐标系可称为机床参考点坐标系，也可称为机械坐标系。

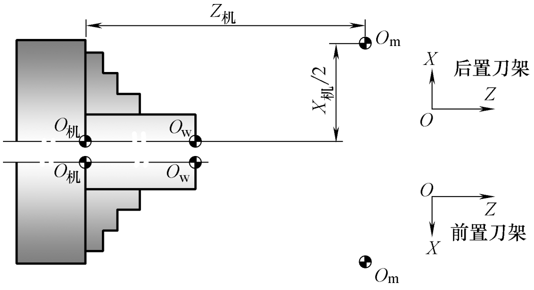


图2-14 数控车床坐标系

应用技巧与禁忌：

1）机床原点$O_{机}$的位置由机床生产厂家确定，一般定在卡盘端面（也有说定在主轴端面）与轴线交点处，它是机床机械部分设计与制造的基准，实际上可以理解为确定X轴和Z轴参考点处行程开关的位置，它对数控编程没有任何作用，通常可以不考虑。实际上这个点是在机床调试时确定了机床参考点O_m后才能体现出来，如果机床返回坐标点操作后的绝对坐标显示为图示机床原点位置的坐标值（$X_{机}$，$Z_{机}$），则认为机床原点是图示$O_{机}$位置。实际中大部分机床将机床返回坐标参考点操作后的绝对坐标显示设置为（0，0），这时应该理解为机床原点与机床参考点O_m重合，这种机床的机床坐标系与机床参考点坐标系重合。

数控系统的综合坐标显示画面中（见图2-15）的机床坐标系指的是机床参考点坐标系，但这时说机床坐标系也不矛盾。

2）机床参考点O_m是数控机床上的一个特殊点，是数控机床各坐标轴上的一个基准点，一般设置在X轴和Z轴正方向的最大位置处，由行程开关的安装位置与数控系统的参数设

置确定，其绝对坐标显示值由数控系统参数 No. 1240 设定，常常设置为全零，故这一点又称为“零点”，返回参考点又常称为“回零”。因此说返回坐标参考点操作后显示画面中显示的绝对坐标值（参数 No. 1240 中的设定值）决定的坐标系才是数控机床真正意义上的机床坐标系。

3）图 2-14 所示的加工坐标系原点 O_w 实际上是工件坐标系原点，该点在加工时通过俗称的“对刀”操作，将该点在机床坐标系中的位置告知数控系统，而这个点一般也是编程坐标系原点，机床运行并建立工件坐标系后就能以加工坐标系为基础加工出编程坐标系的零件。

4）图 2-15 所示为 FANUC 0i mate-TC 数控系统的位置显示画面。其中的机床坐标指的是机床参考点坐标系的坐标值。而绝对坐标分两种情况，在没有建立工件坐标系之前其显示的是机床参考点坐标系中的坐标值，一旦建立起工件坐标系则显示的是工件坐标系的坐标值。

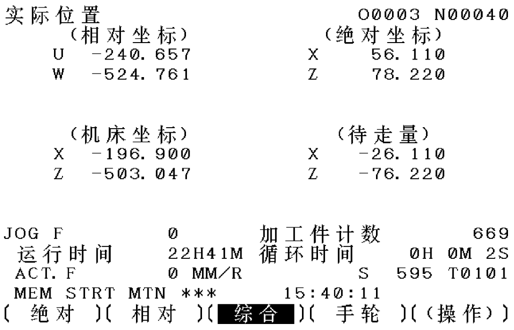


图 2-15　数控车床综合坐标位置显示画面

应用技巧与禁忌：

1）只有在参数 No. 1240 设定的值是机床参考点 O_m 相对于图 2-15 所示机床原点 $O_{机}$ 的坐标值的情况下，才可认为机床坐标系是图示卡盘端面与轴线交点处的机床坐标系 $XO_{机}Z$。

2）数控编程中谈到的机床坐标系实际上是由机床参考点与参数 No. 1240 设定的值共同确定的，大部分机床参数 No. 1240 的各轴设置为全零，因此，返回机床参考点后各轴的绝对坐标显示为全零，这时可认为机床参考点 O_m 确定的坐标系就是机床坐标系。

3）理解了第 2）条的含义，就明白自动设定工件坐标系实际上是在参数 No. 1240 中设定。

4）如果有可能，可以上机床尝试一下修改参数 No. 1240 并“回零”操作后机床绝对坐标的显示变化情况。注意，结束后不要忘记改回原来的设定值。随意改变机床参数是不可取的行为。

2.4.2　机床坐标系与参考点

前面提到，机床坐标系必须通过机床参考点的确定实现。因此，讨论机床坐标系就是讨论机床参考点。

1. 返回机床参考点

数控机床的位置检测元件有相对坐标检测与绝对坐标检测两种。对于采用相对坐标检测装置的数控机床，数控系统通电后并不知道机床参考点的位置，当然也就不知道刀具当前位置的坐标值。为了正确地在机床工作时建立机床坐标系，常在每个坐标轴的移动范围内（数控车床一般在 X 轴和 Z 轴的正向最大行程处向负方向偏移一小段距离，以免行程开关受压时间太长）设置一个机床参考点（测量基准点）。机床通电后，首先要进行自动或手动返回参考点操作，以便建立机床坐标系。对于采用绝对坐标检测元件的数控机床，其参考点的位置已在机床调整时设置在数控系统的参数表中，即使断电以后，仍然可以依靠电池记忆在数控系统中，因此，这种绝对坐标检测元件的数控机床通电后会自动建立起机床坐标系，不

需要执行返回参考点操作。机床参考点可以定在刀架中心、刀架边缘交点或刀尖点上，由机床操作者确定，定在刀尖点上的情形较多。

应用技巧与禁忌：

1）使用数控车床之前，必须明确自己使用的机床是否需要执行手动返回参考点操作。

2）需手动返回参考点操作的车床，由于其参考点的物理位置是由行程开关确定的，因此，必须确保刀具偏离参考点适当距离才能执行手动返回参考点操作。

3）手动返回参考点操作时只能沿一个方向移动，系统参数 No. 1006#5（ZMI）用于设定返回参考点的方向，默认设置为正方向（ZMI = 0）。

4）系统参数 No. 1002#0（JAX）用于设定机床返回参考点时是各轴单独返回还是同时返回，默认设置为各轴单独返回（JAX = 0）。

5）设置为各轴单独返回参考点模式时，建议先返回 *X* 轴，然后再返回 *Z* 轴。否则，可能出现撞刀等意想不到的事故。

6）机床坐标系一经设定，就保持不变直至断电。

7）刀架返回机床参考点的位置是固定的，这时刀架上的任何点均可以认为是参考点，如刀架中心、刀架边缘交点或刀具上的刀位点，由机床操作者确定，定在刀位点上的情形较多。

2. 机床坐标系与参考点的设置

以上谈到的机床参考点，一般指的是第一参考点。FANUC 0i Mate-TC 数控系统允许设置 4 个参考点，其中第 1 参考点简称为参考点，其余的参考点分别称为第 2、3、4 参考点。

应用技巧与禁忌：

1）机床参考点由系统参数 No. 1240 ~ 1243 设定。

2）第 2、3、4 参考点常用于换刀点等设置。

3）机床参考点的绝对坐标常常设置为全零，因此，手动返回机床参考点常又称为“回零”操作。

4）返回参考点的操作还可用自动返回指令 G28 与 G30，具体使用参见相关参考书，这里不作介绍。

5）机床必须先执行返回（第 1）参考点操作（手动或 G28 指令自动返回）后才能执行返回第 2、3、4 参考点操作指令 G30。

2.4.3 工件坐标系

工件坐标系一般可细分为编程坐标系与加工坐标系。前者一般依据工件图样确定，后者在机床加工时通过对刀确定，对刀时一般要求将加工坐标系与编程坐标系重合。以图 2-16 为例，图 2-16a 所示为加工零件图样，编程时将最右端点定义为编程坐标系原点。图 2-16b 为三爪卡盘装夹示意图，采用 ϕ30 棒料，加工坐标系定在毛坯端面偏材料内侧 1mm（即留端面加工余量 1mm）位置处。实际中该棒料安装到车床上的轴向位置是不确定的，因此，必须在

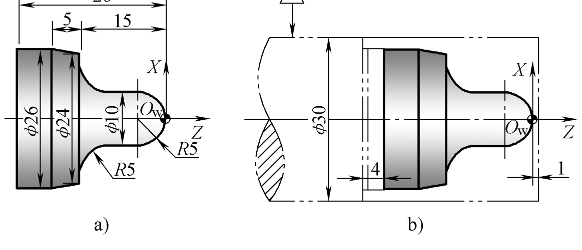


图 2-16 工件坐标系

a）编程坐标系 b）加工坐标系

棒料安装后通过对刀将棒料端面内测 1mm 的原点 O_w 位置（O_w 相当于机床参考点的坐标）告知数控系统（如存入图 2-10a 所示的外形偏置存储器中），加工时，通过相应的工件坐标系建立指令（如通过刀具指令调用外形偏置存储器中的偏置值）以安装后棒料上实际的 O_w 点建立其加工坐标系，这时的加工坐标系才是真正意义上的数控系统能够识别的工件坐标系。

应用技巧与禁忌：

1）编程坐标系与加工坐标系是基于不同的用途命名的，两者紧密联系。

2）尽可能将工件坐标系设定在工件的外端面上，如图 2-16 所示。

3）工件端面是否留加工余量（如图 2-16b 所示的 1mm 余量）取决于编程与工件的加工要求。

2.4.4　数控车床工件坐标系的建立方法

数控车床工件坐标系的建立方法主要有三种，即 T 指令刀具几何偏置、G50 指令设定和 G54 ~ G59 指令工件坐标系预置。另外，还有一种称为自动建立工件坐标系的方法，由于其用得不多，这里仅对其原理进行讨论。

1. T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系

通过 2.3 节的讨论可知，数控车床的 T 指令不仅可以选择刀具，而且可以调用刀具偏置，而刀具的偏置是可以偏移坐标系的。T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系正是基于这个原理，利用刀具的几何偏置将机床参考点处的机床坐标系偏移至工件坐标系所需位置处实现工件坐标系的建立。图 2-17 是其原理示意图。

在图 2-17a 中，假设机床参考点 O_m 选择在刀位点上，工件坐标系原点 O_w 欲设置在零件端面，其几何偏置矢量为 $\boldsymbol{G}$（$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{G}_X+\boldsymbol{G}_Z$），其中分矢量 $\boldsymbol{G}_X=-X/2$，$\boldsymbol{G}_Z=-Z$，若其预先存入图 2-17b 所示的外形偏置画面中 No. 01 的第 2、3 列 X、Z 位置，一旦执行刀具指令 T0101，则选择 1 号刀具并调用 1 号外形偏置存储器中的偏置值，实现工件坐标系的偏移，将坐标系 XO_mZ 移至 XO_wZ 位置处，建立起工件坐标系。这种方法建立工件坐标系的参考程序格式如下：

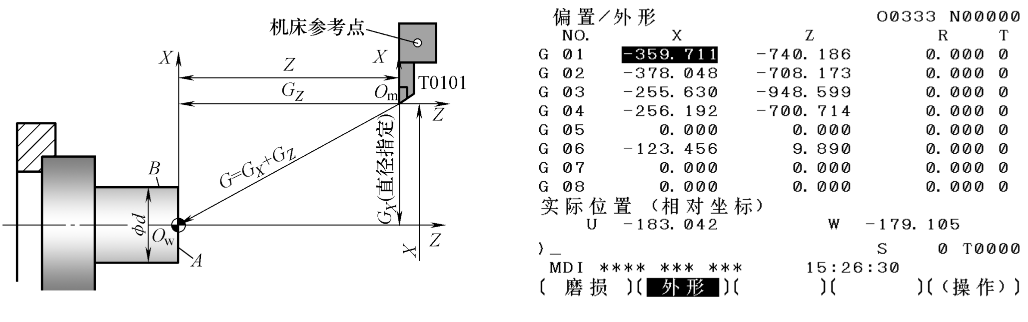


图 2-17　T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系
a）图例　b）几何偏置设置画面

O0201;	程序名
N10 T0101;	调用1号刀及1号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 M03 S300;	主轴正转,转速为800r/min
N30 G99 G00 X*a* Z*b* M08;	快速定位至起刀点(*a*,*b*),开切削液
……	程序主体
N240 G00X*a* Z*b* M09;	快速返回至起刀点(*a*,*b*),关切削液
N250 T0100;	取消1号刀具补偿
N260 M30;	程序结束,返回程序头

应用技巧与禁忌：

1）该方法建立工件坐标系简单易用，应用广泛。

2）该方法建立工件坐标系与刀具当前位置无关。

3）调用刀具补偿指令与取消刀具补偿指令一般成对使用，如以上程序的T0101与T0100。

4）该方法可靠性好，偏置矢量是存储在数控系统中的，任何时候调用，工件坐标系位置均不变。

5）该方法建立工件坐标系是基于刀具指令的，因此各把刀具建立的工件坐标系是独立的，不存在基准刀与非基准刀的问题，多刀切削时，每一把刀具均需对刀设置外形偏置值。如图2-18所示，1号刀和2号刀有独立的分矢量，且必须分别存入No.01和No.02几何偏置存储器中，并分别用T0101和T0202指令调用建立工件坐标系。

6）该方法建立工件坐标系时，G54工件坐标系的偏置值必须清零，否则可能出现撞刀现象。

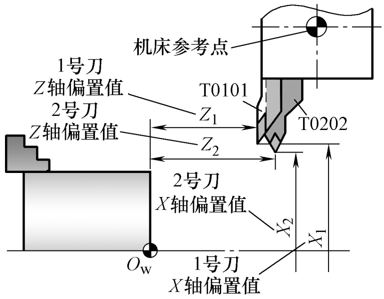


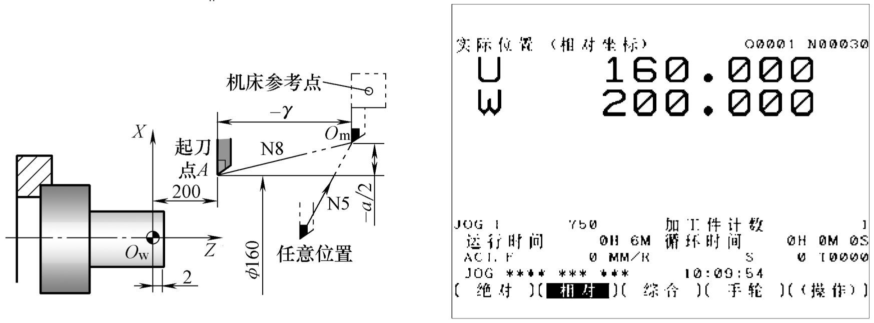
图2-18　多刀几何偏移建立工件坐标系原理

2. G50指令设定工件坐标系

所谓设定工件坐标系，就是确定起刀点相对工件坐标系原点的位置并确定工件坐标系。其指令格式如下：

G50 X_ Z_ ;

其中，X_ Z_是起刀点相对于加工坐标系原点的位置，一般由绝对坐标指定，如图2-19a中*A*点为起刀点，*A*点相对于O_w点的坐标值必须是G50指令中的坐标值，即G50 X160. Z200. 。



a)　　b)

图2-19　G50指令建立工件坐标系

a）工件坐标系建立原理　b）起刀点设定画面

G50 指令设定工件坐标系的参考程序格式如下（假设起刀点为图 2-19 中 *A* 点）：

O0202；	程序名
N10 G50 X160. Z200. M08 ；	G50 指令设定工件坐标系，开切削液
N20 T0101；	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N30 G97 S800 M03；	恒转速控制，主轴正转，转速为 800r/min
……	程序主体
N240 G00 X160. Z200. M09；	快速退刀至对刀点 *A*，关切削液
N250 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N260 M30；	程序结束

程序说明：程序执行之前，刀具必须调整至起刀点 *A* 位置处。

应用技巧与禁忌：

1）G50 指令建立工件坐标系与刀具当前位置有关，因此，该指令仅适合单件小批量生产。

2）由于 G50 指令建立坐标系与刀具当前位置有关，若需要重复使用工件坐标系，必须在程序结束之前返回起刀点并取消刀具补偿，如上述程序的 N240 和 N250 程序段。

3）G50 指令对刀的刀具，必须将相应的刀具几何偏置值全部清零。

4）不要采用无刀具补偿值的刀具指令 T△△00，否则无法实现刀具磨损补偿。

5）多刀加工时，基准刀用 G50 指令对刀，其余刀具为非基准刀，必须用相对几何偏置修正装刀偏差。

6）G50 指令对刀需用相对坐标操作实现，具体是将欲设置的工件坐标系原点设定为相对坐标的零点，然后手动移动刀具至起刀点位置处（见图 2-19b），启动并执行程序。

7）执行 G50 指令程序段时，刀具本身不会移动，但绝对坐标会更新为 G 指令中的坐标值。

8）G50 指令与数控铣削加工中的 G92 指令原理相同。

3. 工件坐标系预置与选择指令 G54 ~ G59

在 FANUC 数控系统中，可以在工件坐标系存储器中预置 6 个工件坐标系［No. 01（G54）~ No. 06（G59）］和一个外部工件零点偏移坐标系 No. 00（EXT），如图 2-20 所示。它们之间的关系如图 2-20a 所示。当外部工件零点偏移值 EXOFS 设置为零时，1 ~ 6 号工件坐标系是以机床参考点为起点偏移的。但若设置了外部工件零点偏移值，则 6 个工件坐标系同时偏移。这 6 个预置的工件坐标可以用指令 G54 ~ G59 在程序中调用并建立相应的工件坐标系。

G54 ~ G59 指令设定工件坐标系的参考程序格式如下：

O0203；	程序名
N10 T0101；	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N20 G97 S800 M03；	恒转速控制，主轴正转，转速为 800r/min
N30 G00 G54 X*a* Z*b* M08；	G54 指令选择工件坐标系，快速移动至起刀点（*a*，*b*），开切削液
……	程序主体
N240 G00X*a* Z*b* M09；	快速返回至起刀点（*a*，*b*），关切削液
N140 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N150 M30；	程序结束，返回程序头

应用技巧与禁忌：

1）G54 ~ G59 预置与选择工件坐标系是大部分数控系统采用的建立工件坐标系的方法，应用广泛。

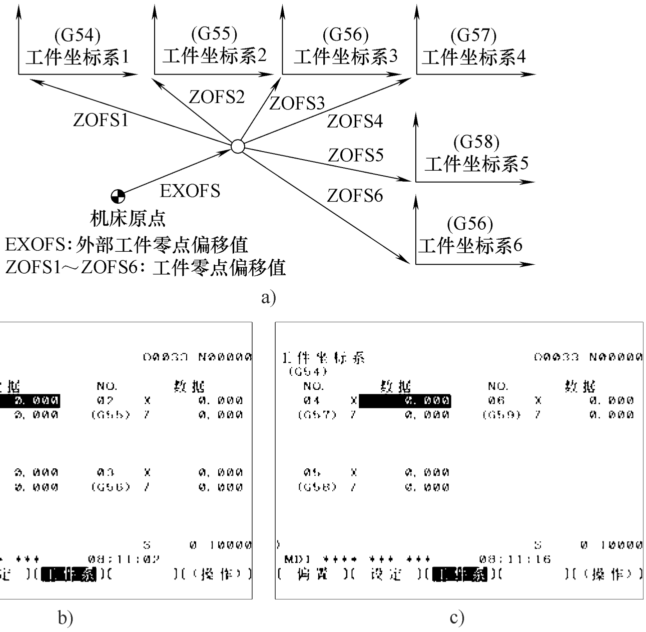


图 2-20　工件坐标系设定画面

a）工件坐标系与外部工件坐标系偏移之间的关系　b）EXT、G54～G56　c）G57～G59

2）G54～G59 建立工件坐标系与刀具当前位置无关，使用方便。

3）与 G50 指令相同，G54～G59 指令对刀的刀具，必须将其几何偏置值全部清零，但刀具指令中仍然要保留刀具补偿号，以便用于刀具磨损补偿。

4）多刀加工时，基准刀用 G54～G59 指令对刀，其余刀具为非基准刀，必须用相对几何偏置修正装刀偏差。

5）程序执行之前，必须将工件坐标系的偏移值写入相应的工件坐标系存储器中。最常使用的方法是在 LCD/MDI 面板上设置，也可用指令 G10 编程输入。

6）大部分数控系统设置为 G54 指令返回坐标参考点后立即生效。因此，可能出现回零操作后的绝对坐标显示为非零。

7）系统参数 No. 1201#7（WZR）可设置机床复位后是否返回 G54 坐标系（即是否立即生效）。

4. 自动建立工件坐标系

（1）机床参考点设置原理　在 2. 4. 2 节中提到，FANUC 0i Mate-TC 系统的参数 No. 1240 用于设定参考点的坐标值，当返回坐标参考点后该值立即生效。以图 2-21 为例，假设刀架

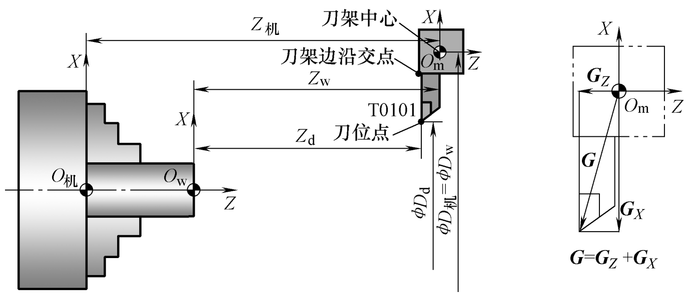


图 2-21　自动建立工件坐标系图例

当前位置为返回坐标参考点操作后的位置，若参数 No. 1240 中的参数设置为 $X=0$ 和 $Z=0$，则位置显示画面上的绝对坐标为 $X=0$ 和 $Z=0$，机床坐标系与机床参考点重合，这是大部分数控车床的默认设置；若参数设置为 $Z_{机}$（假设为 700000）和 $\phi D_{机}$（假设为 450000），则位置显示画面上的绝对坐标为 $X=450.000$ 和 $Z=700.000$，即机床坐标系设置在 $O_{机}$ 位置处；同理，若将参数设置为 Z_w（假设为 500000）和 ϕD_w（假设为 450000），则位置显示画面上的绝对坐标为 $X=450.000$ 和 $Z=500.000$，即机床坐标系设置在 O_w 位置处，这时，若程序中不出现前述的工件坐标系设置指令，且刀具偏置设置为全零，则程序默认是按机床坐标系坐标执行，这就相当于设置了工件坐标系 O_w。

（2）自动设定工件坐标系的方法　明白了以上道理，自然能够理解自动设定工件坐标系的原理，可概括为以下步骤：

1）将欲设置工件坐标系原点相对于机床参考点（图中假设为刀架中心）的坐标值输入参数 No. 1240 中的相应位置（数值单位为 μm）。

2）执行自动返回参考点操作后，位置显示画面中的绝对坐标值就显示为设置值（单位为 mm，小数点后保留三位数），即自动建立起了机床坐标系。

（3）参考点具体位置　图 2-21 中的刀架仅仅是返回参考点中的位置，实际是由进给坐标轴上的行程开关确定，至于刀架上的哪一点是参考点，完全取决于操作者的确定，一般取一些特殊点，如图示刀架中心点位置、刀架边缘交点或刀位点。选择刀架中心位置固定、确切，选择刀架边沿点要求刀架各边沿相对于中心的位置精度高或一致性好，而选择刀位点对刀确定参数值方便。

注意刀位点才是实际描述切削轨迹的点，若机床参考点选在刀架中心，则程序中必须通过刀具几何偏置（图中刀架中心至刀位点的偏置矢量 $\boldsymbol{G}$）将参数 No. 1240 偏置至刀位点上，才能保证加工零件的正确性。因此，确切测量刀架边沿至刀架中心的尺寸、准确方便地测量刀位点至刀架边沿的尺寸，是确定刀具几何偏置值的基础。这些尺寸值可以借助数控机床的位置坐标显示值等确定，这里不作讨论。

（4）自动设置工件坐标系的方法　总结现有资料可见以下几种设置方法：

1）基于刀架中心自动设置工件坐标系，这种方法就是将图 2-21 中的 Z_w 和 ϕD_w 输入参数 No. 1240 中，机床返回参考点后就能自动建立起工件坐标系 XO_wZ。其前期需做一定的工作，如要求测量出刀架边沿至刀架中心的尺寸、掌握刀位点至刀架边沿尺寸的测量方法、掌握测量工件坐标系与刀架边沿尺寸的测量方法。

使用这种方法时，每把刀具均需测量并计算出图 2-21 所示的偏置矢量 $\boldsymbol{G}$，并存入各自相应的刀具外形偏置存储器中，通过程序中的刀具 T 指令实现刀架中心向刀位点的偏移，加工出合格的零件。

该方法每把刀具均需单独设置偏置量，不分标准刀与非标准刀，使用方法简单、规范。

2）在参数 No. 1240 中预设一个大致的机床坐标系[16]，这种方法是先在参数 No. 1240 中预设一个机床坐标系，这个机床坐标系一般与欲设置的工件坐标系不重合。然后，通过试切对刀的方法测量出工件坐标系与预设的机床坐标系的偏移值，即求出预设坐标系与要设置工件坐标系的偏置矢量，然后将偏移量输入加工刀具指令调用的刀具偏置存储器中，通过刀具几何偏置建立工件坐标系。

这种方法实质上就是前述的 T 指令建立工件坐标系，只是工件坐标系设置的位置不同。

3）基于刀位点直接设置工件坐标系[16]，这种方法实质上就是将图 2-21 中的 Z_d 和 ϕD_d 输入参数 No. 1240 中，机床返回参考点后就能自动建立其工件坐标系 XO_wZ。

这种方法使用时对刀的刀具（如图 2-21 中的 T0101）相当于一把标准刀，其余刀具则属于非标准刀，其刀位点与标准刀刀位点的装刀偏差需用刀具相对几何偏置进行修正，详见 4. 5. 1 节的介绍。

这种方法建立工件坐标系可方便地自动建立工件坐标系，但要注意标准刀与非标准刀的确定。

5. 选择机床坐标系指令 G53 及其应用技巧

选择机床坐标系指令 G53 用于指定刀具在机床坐标系中的位置。其指令格式为：

G53 X_ Z_；

其中，X_ Z_为刀具在机床坐标系中的绝对坐标值。执行该指令后，刀具会快速移动至指令中指定的机床坐标系中的绝对坐标位置处。

应用技巧与禁忌：

1）G53 指令是非模态指令，仅在程序段中有效。

2）尺寸字 X_ Z_必须是机床坐标系中的绝对坐标值，如果指定了增量坐标值 U_ W_，则 G53 指令被忽略。

3）执行 G53 指令之前必须建立机床坐标系，可手动返回参考点操作（即回零）或用 G28 指令自动返回参考点。

4）执行 G53 指令，会取消刀尖圆弧半径补偿和刀具几何偏置。

应用示例：

由上文已知，G50 指令建立工件坐标系与刀具当前位置有关，这一特点使得该指令程序每次开机时或中途刀具偏离对刀点位置时均需重新对刀操作，能否将其改造为类似于 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系与刀具当前位置无关的特点呢？仍以图 2-19 为例，阅读完以下程序就能知道答案了。

O0204；	程序名
/N5 G28 U1. 0 W1. 0；	自动返回机床参考点（O_m点）
/N8 G53 X-α Z-γ；	刀具快速移动至对刀点 A
N10 G50 X160. Z200. M08 ；	G50 指令设定工件坐标系，开切削液
N20 T0101；	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N30 G97 S800 M03；	恒转速控制，主轴正转，转速为 800r/min
……	（程序主体）
N240 G00 X160. Z200. M09；	快速退刀至对刀点 A，关切削液
N250 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N260 M30；	程序结束

编程技巧分析：

1）该程序以图 2-19 对应的程序 O0202 为对象，在前面增加了两个程序段，用到了自动返回参考点操作指令 G28、选择机床坐标系指令 G53 和程序段跳选（符号“/”）功能。

2）N8 程序段中的（$-\alpha$，$-\gamma$）为起刀点相对于机床参考点的坐标值，必须在 G50 指令对刀后在综合位置显示画面中查询该机床坐标值，并手工写入程序中。

3）程序执行过程，首先，在释放程序段跳选按键的条件下执行程序，执行 N5 程序段，刀具可从任意位置返回机床参考点；执行至 N8 程序段，快速移动至起刀点 A；执行至 N10 程序段即可建立工件坐标系；执行程序结束前的 N240 程序段，刀具返回起刀点 A，为下一次执行程序完成对刀过程。由于 N240 程序段的存在，第二次执行该程序时，N5 和 N8 程序段已经成为多余的了，因此，可以按下程序段跳选按键，使程序段跳选功能生效，再次执行程序时就与 O0202 完全相同。

4）该程序对理解指令 G53 与程序段跳过功能非常有用。

6. 工件坐标系建立程序示例

以图 2-16 所示零件的轮廓精加工程序为例，其加工轨迹的规划如图 2-22 所示，A 点为起刀点，采用圆弧切线切入。此处程序仅写出精车程序，若上机切削加工，只能用尼龙等软材料演示加工。

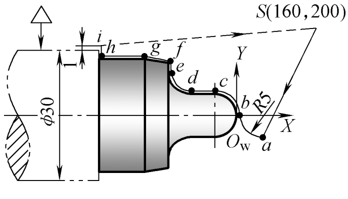


图 2-22　加工轨迹规划图

（1）T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系　程序如下所示：

```
O0205;                              程序名
N10 T0303;                          调用 3 号刀及 3 号刀具补偿建立工件坐标系
N20 G97 S800 M03;                   主轴正转,转速为 800r/min
N30 G00 X160. Z200. ;               刀具快速定位至起刀点 S
N40 X-10. Z5. M08;                  快速移动至 a 点,开切削液
N50 G99 G02 X0 Z0 R5. F0. 3;        圆弧切线切入至 b 点,进给量为 0. 3mm/r
N60 G03 X10. Z-5.  R5. ;            切削 R5 球头至 c 点
N70 G01 Z-10. ;                     切削 φ10 圆柱至 d 点
N80 G02 X20.  Z-15.  R5. ;          切削 R5 过渡圆角至 e 点
N90 G01 X24. ;                      切削端面至 f 点
N100 X26.  Z-20. ;                  切削锥面至 g 点
N110 Z-30. ;                        切削 φ26 圆柱至 h 点
N120 X32. ;                         径向切出至 i 点
N130 G00 X160.  Z200.  M09;         快速返回至起刀点 S,关切削液
N140 T0300;                         取消刀具补偿
N150 M30;                           程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：

1）3 号刀具偏置存储器中存入的是工件坐标系原点相对于机床参考点的偏移值。

2）程序执行时与刀具当前位置无关。

3）圆弧切线切入方式能有效改善球头顶部的加工质量。

4）N130 程序段的返回起刀点仅是一个良好的习惯，对 T 指令几何偏置建立工件坐标系并不是必需的。

5）关机后重新启动机床也不会改变工件坐标系的位置。

6）该程序暂时未考虑刀尖圆弧半径补偿，因此球头与过渡圆角存在一定的误差。

7）该程序中有多个成对使用的指令，如 M03 与 M30（M05 隐含在其中）、M08 与 M09、T0303 与 T0300 等。

（2）G50 指令建立工件坐标系　程序如下所示：

O0206；	程序名
N10 G50 X160. Z200.；	G50 指令设定工件坐标系
N20 T0303；	调用 3 号刀及 3 号刀具补偿
N30 G97 S800 M03；	主轴正转,转速为 800r/min
N40 G00 X-10. Z5. M08；	快速移动至 *a* 点,开切削液
N50 G99 G02 X0. Z0. R5. F0.3；	圆弧切线切入至 *b* 点,进给量为 0.3mm/r
N60 G03 X10. Z-5. R5.；	切削 *R*5 球头至 *c* 点
N70 G01 Z-10.；	切削 ϕ10 圆柱至 *d* 点
N80 G02 X20. Z-15. R5.；	切削 *R*5 过渡圆角至 *e* 点
N90 G01 X24.；	切削端面至 *f* 点
N100 X26. Z-20.；	切削锥面至 *g* 点
N110 Z-30.；	切削 ϕ26 圆柱至 *h* 点
N120 X32.；	径向切出至 *i* 点
N130 G00 X160. Z200. M09；	快速返回至起刀点 *A*,关切削液
N140 T0300；	取消刀具补偿
N150 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）对刀时，3 号刀具偏置存储器中的外形和磨损偏置值必须清零。之所以调用主要是考虑使用时用磨损补偿值补偿刀具磨损或精确修调加工尺寸。

2）程序执行时与刀具当前位置有关，因此重复执行程序时，程序段 N130 返回起刀点是必需的。

3）每日关机清扫机床时，若移动了刀具起刀点的位置，下次开机使用时必须重新对刀。有兴趣的读者可参照前述 G53 指令的示例程序 O0204 改造本程序。

（3）G54～G59 指令建立工件坐标系　程序如下所示（以 G54 指令为例）：

O0207；	程序名
N10 T0303；	调用 3 号刀及 3 号刀具补偿
N20 G97 S800 M03；	主轴正转,转速为 800r/min
N30 G54 G00 X160. Z200.；	选择 G54 工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 *A*
N40 X-10. Z5. M08；	快速移动至 *a* 点,开切削液
N50 G99 G2 X0. Z0. R5. F0.3；	圆弧切线切入至 *b* 点,进给量为 0.3mm/r
N60 G03 X10. Z-5. R5.；	切削 *R*5 球头至 *c* 点
N70 G01 Z-10.；	切削 ϕ10 圆柱至 *d* 点
N80 G02 X20. Z-15. R5.；	切削 *R*5 过渡圆角至 *e* 点
N90 G01 X24.；	切削端面至 *f* 点
N100 X26. Z-20.；	切削锥面至 *g* 点
N110 Z-30.；	切削 ϕ26 圆柱至 *h* 点
N120 X32.；	径向切出至 *i* 点
N130 G00 X160. Z200. M09；	快速返回至起刀点 *A*,关切削液
N140 T0300；	取消刀具补偿
N150 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）对刀时，G54 工件坐标系存储器中存入的是工件坐标系原点相对于机床参考点的位置偏差。

2）程序执行时与刀具当前位置无关。

3）圆弧切线切入方式能有效改善球头顶部的加工质量。

4）N130 程序段的返回起刀点仅是一个好的习惯，对 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系并不是必需的（与 T 指令对刀类似）。

5）关机后重新启动机床也不会改变工件坐标系的位置（与 T 指令对刀相同）。

（4）自动建立工件坐标系程序　这种程序中不再需要建立工件坐标系，因此，程序中不需要相应的建立工件坐标系指令。例如程序 O0205 程序中 3 号刀具补偿存储器中的几何偏置存储器清零（即不需对刀），或者程序 O0207 中的删除 G54 指令。

2.5　固定循环指令

固定循环指令简称循环指令，是一种简化编程的指令，类似于宏程序。不同的数控系统固定循环指令的格式差异较大，这里以 FANUC 0i Mate-TC 系统为例进行讨论。

2.5.1　简单循环指令 G90/G94 编程技巧

简单循环指令主要针对车削加工中各种广泛应用的外（内）圆柱（锥）面以及圆平（锥）端面加工而设计，简单循环指令与基本编程指令相比可进一步简化程序结构。另有一个螺纹加工指令 G92，放在 2.6 节螺纹编程部分合并讲解。

1. 外、内圆柱（锥）面车削简单循环指令 G90

（1）基本概念与指令格式　外、内圆柱（锥）面切削简单循环指令 G90 可用于加工外、内圆柱（锥）面。其动作循环简图如图 2-23、图 2-24 所示，指令格式如下：

G90 X(U)_ Z(W)_ F_;　　　　圆柱面车削固定循环指令

或

G90 X(U)_ Z(W)_ R_ F_;　　　　圆锥面车削固定循环指令

其中，X_ Z_是圆柱面切削终点 C 的绝对坐标值；

U_ W_是圆柱面切削终点 C 相对于循环起点 A 的增量坐标值；

F_是切削加工进给速度；

R_是圆锥面的切削始点 B 与切削终点 C 的半径差，且 $|R| \leq |U/2|$。

注意，圆柱面与圆锥面车削循环指令的差异体现在锥度参数 R，当 $R=0$ 时便是圆柱面。

应用技巧与禁忌：

1）G90、G94 与 G92 为同组的模态指令。

2）G90 指令适合于长径比较大的轴类圆柱面加工，主要加工面为圆柱（锥）面。

3）上述指令格式中，若 $R=0$ 或不写，则为圆柱面车削循环指令，如图 2-23 所示；否则，为圆锥面车削循环指令，如图 2-24 所示。

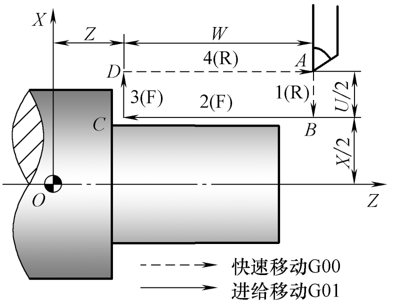


图 2-23　圆柱面车削简单循环

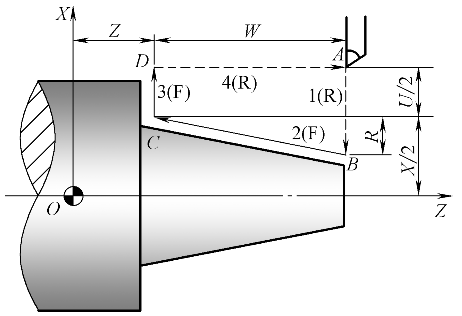


图 2-24　圆锥面车削简单循环

4）该指令是针对毛坯材料为圆钢而开发的。

5）该指令可用于粗、精加工。粗加工时，动作 3 的端面预留的精加工余量应适当减小，以减小精车时的切削宽度（即同时切削的切削刃长度）。

6）动作循环可描述为：1(R)→2(F)→3(F)→4(R)。其中动作 1、4 为快速移动，动作 2、3 为切削进给加工。

7）“单段”运行方式下，每按一次 循环起动 按钮，只能完成其中一个动作。

8）圆柱面车削循环一般通过改变切削终点 *C* 的 *X* 坐标实现多刀加工。

9）圆锥面车削固定循环存在一个锥度参数 *R*，可固定锥度参数 *R* 仅改变切削终点 *C* 的 *X* 坐标实现等厚度多刀加工。也可固定终点 *C* 的坐标，仅改变锥度参数 *R* 实现变厚度多刀加工。

10）执行 G90、G92、G94 以外的 01 组的代码即取消 G90 固定循环。

11）根据 *C* 点与 *A* 点的位置关系，可实现外圆与内孔的循环加工，如 *C* 点在 *A* 点的左上角时为内孔加工。以锥面加工、增量坐标编程为例，其关系如图 2-25 所示。

（2）**圆柱面车削循环加工编程技巧**

1）单一外圆柱编程示例。以图 2-26 所示零件为例，利用 G90 指令进行粗、精加工，起刀点 *S* 坐标为（150，150），循环起点 *A* 的坐标为（110，3），参考程序如下：

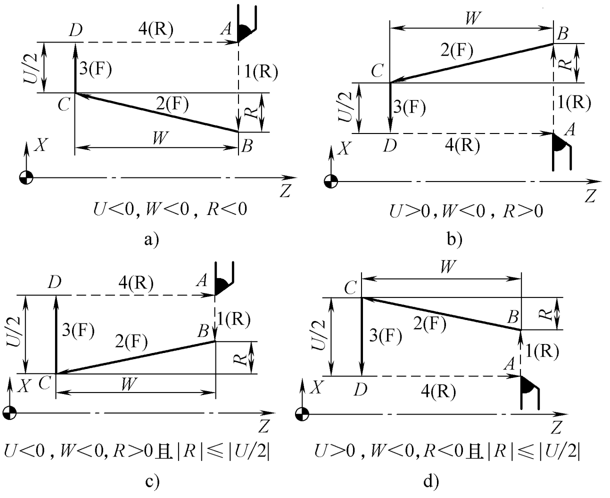


图 2-25　圆锥车削固定循环

a）加工外圆正锥　b）加工内圆正锥

c）加工外圆倒锥　d）加工内圆倒锥

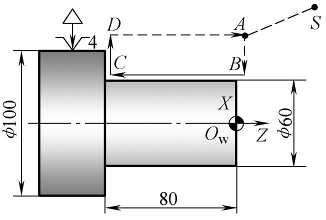


图 2-26　单一外圆柱 G90 指令编程图例

```
O0208;                                  程序名
N10 T0101;                              调用 1 号刀及 1 号刀具补偿建立工件坐标系
N20 G97 S600 M03;                       恒转速切削,主轴正转,转速为 800r/min
N30 G00 X150.0 Z150.0;                  快速定位至起刀点 S
N40 X110.0 Z3.0;                        快速移动至固定循环起点 A
N50 G90 X95.0 Z-79.9 F0.3;              G90 指令粗车外圆至 φ95,进给速度为 0.3mm/r
N60 X90.0;                              X 轴步进进刀粗车外圆至 φ90
N70 X85.0;                              X 轴步进进刀粗车外圆至 φ85
N80 X80.0;                              X 轴步进进刀粗车外圆至 φ80
N90 X75.0;                              X 轴步进进刀粗车外圆至 φ75
N100 X70.0;                             X 轴步进进刀粗车外圆至 φ70
N110 X65.0;                             X 轴步进进刀粗车外圆至 φ65
N120 X60.8;                             X 轴步进进刀粗车外圆至 φ60.8
N130 G00 X150.0 Z150.0;                 快速返回至起刀点 S
N140 T0100;                             取消 1 号刀具补偿
N150 T0202;                             调用 2 号刀及 2 号刀具补偿,建立工件坐标系
N160 G50 S1200;                         主轴速度钳制设置
N170 G96 S180 M03;                      恒限速度切削,切削速度为 180m/min
N180 G00 X110.0 Z3.0;                   快速定位至固定循环起点 A
N190 G90 X60.0 Z-80.0 F0.1;             G90 指令粗车外圆至尺寸,进给速度为 0.1mm/r
N200 G00 X150.0 Z150.0;                 快速返回至起刀点 S
N210 T0200;                             取消 2 号刀具补偿
N220 M30;                               结束程序,返回程序头
```

编程技巧分析：

① 由于 G90 为模态指令，因此，多次切削时仅需写出变化的 X 坐标，简化程序编写，书写规范、方便，如程序段 N60 ~ N120。

② 可用 G90 指令实现圆柱面的粗、精车加工。

③ 注意精车时动作 3 的端面加工余量尽可能取小一点。本例外圆单面余量取 0.4mm，端面余量仅 0.1mm。

④ G90 指令多次切削时，端面存在多次无余量切削，造成表面加工质量下降，刀具易磨损。读者可思考改进方法（提示：改写循环起点位置，甚至用 G71 指令编程等）。

2）阶梯外圆编程示例。以图 2-27 所示的阶梯圆柱零件为例，利用 G90 指令进行粗加工，起刀点 S 坐标为（160，200），循环起点 A 的坐标为（32，4），参考程序如下：

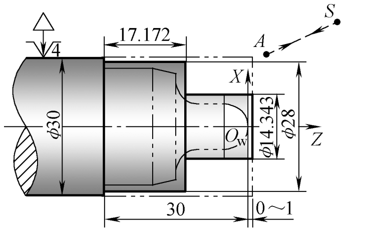


图 2-27　阶梯外圆 G90 指令编程图例

```
O0209;                                  程序名
N10 G50 X160. Z200.;                    G50 指令建立工件坐标系
N20 T0101;                              调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N30 S800 M03;                           主轴正转,转速为 800r/min
N40 G00 X32. Z4.;                       快速定位至固定循环起点 A
N50 G90 X28. Z-30. F0.2;                G90 指令车大外圆至 φ28,进给速度为 0.2mm/r
```

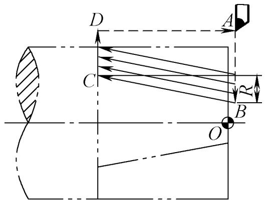
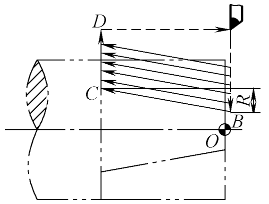
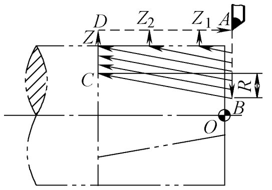
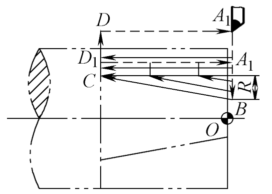
N60 X25. Z-12. 828；	G90 指令车小外圆至 $\phi25$，进给速度为 0. 2mm/r
N70 X22. ；	X 轴步进进刀车小外圆至 $\phi22$
N80 X19. ；	X 轴步进进刀车小外圆至 $\phi19$
N90 X16. ；	X 轴步进进刀车小外圆至 $\phi16$
N100 X14. 343；	X 轴步进进刀车小外圆至 $\phi14.343$
N110 G00 X160. Z200. ；	快速返回至起刀点 S
N120 T0100；	取消刀具补偿
N130 M30；	结束程序，返回程序头

编程技巧分析：基于 G90 指令模态特点，阶梯外圆切削时需增加一个改变终点 Z 轴坐标值的程序段（程序段 N60）实现。

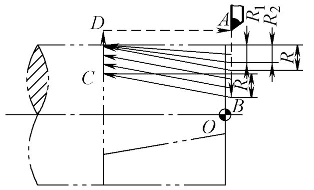
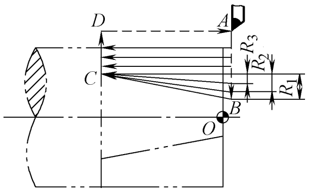
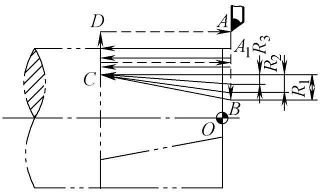
（3）圆锥面车削循环加工编程技巧　G90 指令圆锥面车削的加工方案变化较多，值得讨论。

1）加工方案的讨论。加工方案包括：等厚度与变厚度分层切削加工、Z 轴变终点坐标的等厚度分层锥面切削加工和圆柱面与圆锥面循环指令组合的加工方案。详见表 2-1。

表 2-1　圆锥面加工方案分析

序　号	加工方案图示	简　　述
1		方案 1：基于切削终点 C 的 X 轴坐标等厚度分层加工 简述：固定锥度参数 R，仅改变终点坐标的 X 值的圆锥面车削循环加工 优点：与圆锥面车削循环指令直接吻合，编程简单 缺点：第 1 刀的加工余量太大，可能打坏刀具
2		方案 2：增加虚拟切削终点 C 的等厚度分层加工 简述：基于方案 1 的缺点，通过沿 X 轴增加虚拟切削终点的方法增加切削次数 优点：程序书写规范，计算工作量小 缺点：新增的切削段存在一定的空刀加工，同时端面 CD 段切削长度增加，造成加工效率的下降
3		方案 3-1：变切削终点 C 的等厚度分层加工 简述：根据实际切削长度确定切削终点，出现了同时改变 X 和 Z 坐标的程序段 优点：克服了方案 2 的缺点 缺点：增加了切削终点坐标计算的工作量，且增加了程序书写的复杂性
		方案 3-2：变切削终点 C 的等厚度分层加工 简述：将方案 3-1 进行改造，与圆柱循环车削组合，并将圆锥切削起点重新设定（图中 A_1 点） 优点：进一步减小切削长度，提高工作效率 缺点：同方案 3-1

（续）

序　号	加工方案图示	简　　述
4		方案 4：变厚度 + 等厚度分层的锥面加工 简述：通过固定切削终点坐标，仅改变锥度参数 R 的变厚度锥面车削，并组合等厚度锥面车削循环加工 优点：变厚度在先，等厚度在后，锥面表面加工质量较好 缺点：计算工作量稍大
5		方案 5-1：圆柱面等厚度 + 圆锥面变厚度的锥面加工 简述：先圆柱等厚度加工，然后圆锥面变厚度锥面加工的组合方式 优点：计算量小，编程方法规整 缺点：变厚度在后，造成靠近 C 点的锥面切削厚度逐渐减小，直至为零的现象，使表面加工质量略有下降
		方案 5-2：圆柱面等厚度 + 圆锥面变厚度的锥面加工 简述：将方案 5-1 中圆锥面变厚度加工的循环起点重新设定（图中 A_1 点） 优点：进一步减小方案 5-1 轨迹长度，提高加工效率 缺点：同方案 5-1，且略微增加了起点的计算工作量

2）程序示例。试用 G90 指令加工图 2-28 所示的锥面部分。毛坯直径为 ϕ100mm，采用 T0101 号车刀，恒转速切削，主轴转速为 800r/min，进给速度为 0. 25mm/min，工件坐标系定在零件右端面中心，起刀点坐标为（200，100）。

① 程序示例 1：按表 2-1 中方案 1 编程。图 2-29a 所示为锥度部分编程与加工简图，锥度切削始点沿 Z 轴延伸了 5mm，计算出的编程锥度参数 R 为 10. 525mm，固定循环起点 A 设定为（110，5）。图 2-29b 所示为刀具轨迹图。

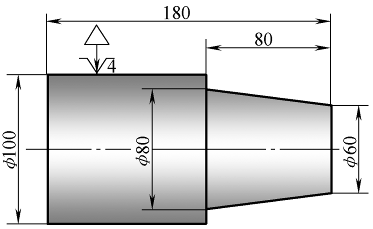


图 2-28　圆锥面加工零件简图

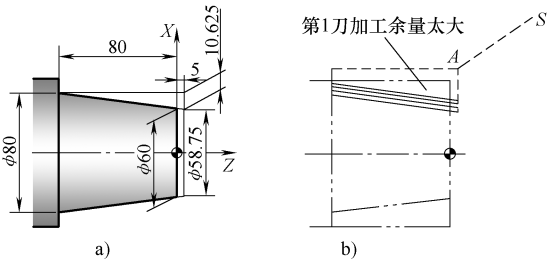


图 2-29　按表 2-1 中方案 1 的计算简图与刀具轨迹
a）计算简图　b）刀具轨迹图

数控加工程序如下：

```
O0210；                                    程序名
N10 G97 S800 M03；                         恒转速切削,主轴正转,转速为 800r/min
N20 T0101；                                选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N30 G00 X200. 0 Z100. 0；                  刀具快速定位至起刀点 S
N40 X110. 0 Z5. 0 M08；                    快速定位至固定循环起点 A,开切削液
N50 G90 X95. 0 Z-80. 0 R-10. 625 F0. 25；  指令外圆锥面车削固定循环
```

N60 X90.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ90
N70 X85.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ85
N80 X80.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ80
N90 G00 X200.0 Z100.0 M09;	快速返回到起刀点 S,关切削液
N100 T0100;	取消刀具补偿
N110 M30;	结束程序,返回程序头

编程技巧分析：该程序参照圆柱面车削固定循环指令改变终点 X 坐标的方法编写，第 1 刀存在较大的加工余量，仅供学习参考，不适合金属材料的实际加工。

② 程序示例 2：按表 2-1 中方案 3-1 编程，其 C 点坐标计算及刀具轨迹如图 2-30 所示。

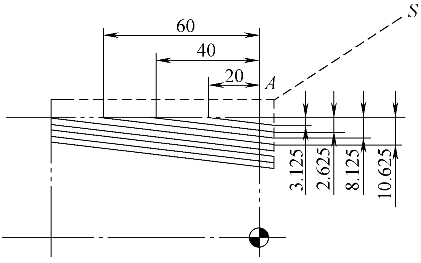


图 2-30　变切削终点 C 的等厚度分层加工

数控加工程序如下：

O0211;	程序名
N10 G97 S800 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 800r/min
N20 T0101;	选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N30 G00 X200.0 Z100.0;	刀具快速定位至起刀点 S
N40 X110.0 Z5.0 M08;	快速定位至固定循环起点 A,开切削液
N50 G90 X100.0 Z-20.0 R-3.125 F0.25;	变终点坐标固定循环车削锥面(第 1 刀)
N60 Z-40.0 R-5.625;	变终点坐标固定循环车削锥面(第 2 刀)
N70 Z-60.0 R-8.125;	变终点坐标固定循环车削锥面(第 3 刀)
N80 Z-80.0 R-10.625;	变终点坐标固定循环车削锥面(第 4 刀)
N90 X95.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ95
N100 X90.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ90
N110 X85.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ85
N120 X80.0;	X 轴步进进刀车锥面至左端直径 ϕ80
N130 G00 X200.0 Z100.0 M09;	快速返回到起刀点 S,关切削液
N140 T0100;	取消刀具补偿
N150 M30;	结束程序,返回程序头

编程技巧分析：该程序通过改变锥面切削的终点坐标 X 和 Z 实现了等厚度锥面循环车削，且基本无多余空刀现象，但 N50 ~ N80 程序段的终点坐标计算较为复杂。

③ 程序示例 3：按表 2-1 中方案 5-1 编程，其 C 点坐标计算及刀具轨迹如图 2-31 所示。

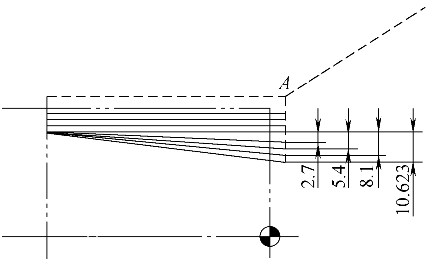


图 2-31　圆柱面等厚度 + 圆锥面变厚度锥面加工

数控加工程序如下：

O0212;	程序名
N10 G97 S800 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 800r/min
N20 T0101;	选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿,建立工件坐标系

N30 G00 X200.0 Z100.0;	刀具快速定位至起刀点 *S*
N40 X110.0 Z5.0 M08;	快速定位至固定循环起点 *A*,开切削液
N50 G90 X95.0 Z-80.0 F0.25;	指令外圆柱面车削固定循环,车圆柱面至 ϕ95
N60 X90.0;	*X* 轴步进进刀车圆柱面至 ϕ90
N70 X85.0;	*X* 轴步进进刀车圆柱面至 ϕ85
N80 X80.0;	*X* 轴步进进刀车圆柱面至 ϕ80
N85 G00 X82.0;	重新定位圆锥面固定循环起点 *A*
N90 G90 X80.0 Z-80.0 R-2.7;	指令圆锥面车削固定循环,变厚度车第 1 刀
N100 X80.0 Z-80.0 R-5.4;	变厚度车第 2 刀
N110 X80.0 Z-80.0 R-8.1;	变厚度车第 3 刀
N120 X80.0 Z-80.0 R-10.625;	变厚度车第 4 刀
N130 G00 X200.0 Z100.0 M09;	快速返回到起刀点 *S*,关切削液
N140 T0100;	取消刀具补偿
N150 M30;	结束程序,返回程序头

编程技巧分析：图 2-31 所示的刀具轨迹为以上程序不含 N85 程序段。若增加了 N85 程序段，则为表 2-1 中方案 5-2 的加工程序。

表 2-1 中方案未写出的程序，读者可参照以上程序格式尝试编程。

2. G90 指令编程与应用综合示例

图 2-32 所示零件材料为 45 钢，毛坯选用 ϕ70 棒料，试用 G90 指令编程加工，起刀点 *S* 为（160.，200.）。加工程序如下：

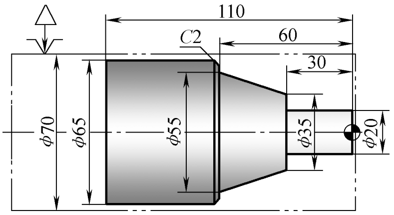


图 2-32　G90 指令综合编程图例

O0213;	程序名
N10 G50 S1000;	主轴最高速度钳制设置
N20 G96 S100 M03;	恒限速切削,主轴正转,切削速度为 100m/min
N30 G00 X160. Z200.;	快速定位至起刀点 *S*
N40 T0101;	选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N50 G00 X73. Z0;	快速定位至车端面起点
N60 G01 X0 F0.2;	车端面
N70 G00 X72. Z3.;	快速定位至车削循环起点 *A*
N80 G90 X67.5 Z-115. F0.3;	指令 G90 车削固定循环,车削至 ϕ67.5
N90 X65.5;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ65.5
N100 X60. Z-59.9;	改变切削终点坐标锥面循环粗车至 ϕ60.0
N110 X56.;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ56.0
N120 X48.5 Z-29.9;	改变切削终点坐标循环粗车至 ϕ48.5
N130 X41.5;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ41.5
N140 X34.5;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ34.5
N150 X27.5;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ27.5
N160 X20.5;	*X* 轴步进进刀循环车削至 ϕ20.5
N170 G00 X56. Z-29.5;	快速定位至圆锥车削循环起点 A_1
N180 G90 X55.5 Z-40.0 R-3.5 F0.4;	指令 G90 圆锥面车削循环(第 1 刀)
N190 Z-50. R-7.;	圆锥面车削循环(第 2 刀)

N200 Z-60. R-10.; 圆锥面车削循环至尺寸(第 3 刀)
N210 G00 X160. Z200.; 快速返回起刀点
N220 T0100; 取消 1 号刀具补偿
N230 T0202; 选择 2 号刀,调用 2 号刀具补偿,建立工件坐标系
N240 S120 M08 T0202; 指定主轴切削速度,开切削液
N250 G42 G00 X20. Z2.; 启动刀尖圆弧右补偿,快速定位至精车起点
N260 G01 Z-30. F0.1; 精车圆柱面 ϕ20
N270 X35.; 精车端面至 ϕ35
N280 X55. Z-60.; 精车圆锥面至 ϕ55
N290 X61.; 精车端面至 $C2$ 倒角起点
N300 X65. W-2.; 车倒角 $C2$
N310 Z-115.; 精车圆柱面 ϕ65,并延长 5mm
N320 U11. M09; 径向退刀,关切削液
N330 G40 G00 X160. Z200.; 快速返回起刀点,取消刀尖圆弧半径补偿
N340 T0200; 取消 2 号刀具补偿
N350 M30; 结束程序,返回程序头

编程技巧分析:

1) 本例利用 G90 指令进行加工,先用圆柱车削固定循环粗车,再用变厚度圆锥车削循环粗车圆锥面,最后,用基本指令进行精车,并启用了刀尖圆弧半径补偿功能。

2) 精车启用刀尖圆弧半径补偿,可提高圆锥面的加工精度。

3) 本例的刀具轨迹可参见图 2-33。

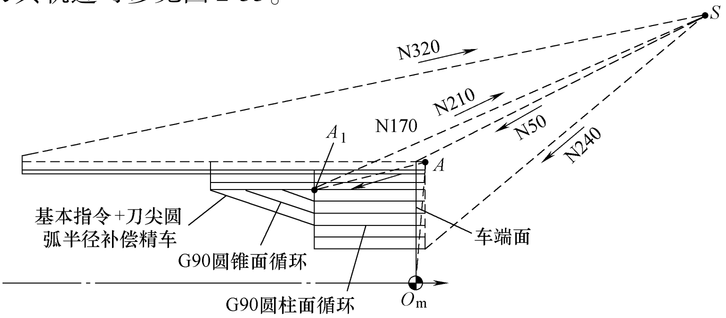


图 2-33 程序 O0213 刀具轨迹

3. 端面车削循环指令 G94

(1) 基本概念与指令格式 上文所述的外、内圆柱(锥)面切削循环指令 G90 主要用于长径比较大的轴类零件加工,其切削方向以 Z 轴为主。对于长径比较小的盘类零件,其特点是圆柱面的长度小,直径方向的尺寸大,这时若仍然采用 G90 加工,则切削长度小,空行程较多。为此,数控系统设计了针对这种以盘类零件端面加工为主的循环指令——端面车削循环指令 G94。与 G90 类似,G94 指令也分为平端面和锥端面加工指令。其动作循环简图如图 2-34、图 2-35 所示,指令格式如下:

G94 X(U)_ Z(W)_ F_; 平端面车削固定循环指令

或

G94 X(U)_ Z(W)_ R_ F_; 锥端面车削固定循环指令

其中，X_ Z_是端面切削终点 C 的绝对坐标值；

U_ W_是端面切削终点 C 相对于循环起点 A 的增量坐标值；

F_是切削加工进给速度；

R_是端面切削始点 B 与切削终点 C 的在 Z 方向的长度差，且 $|R| \leq |W|$。

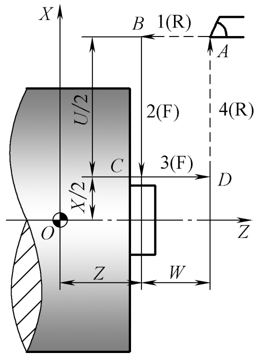


图 2-34　平端面车削固定循环

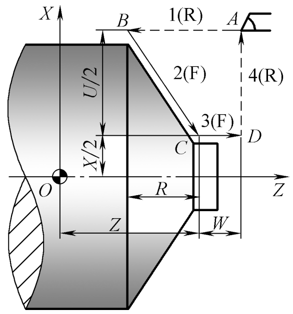


图 2-35　锥端面车削固定循环

注意，平端面与锥端面车削循环指令的差异体现在锥度参数 R，当 $R=0$ 时便是平端面。

应用技巧与禁忌（读者可参照 G90 指令对照学习）：

1）G90、G94 与 G92 为同组的模态指令。

2）G94 指令适合于长径比较小的盘类平（锥）端面加工，主要加工面为平（锥）端面。

3）上述指令格式中，若 $R=0$ 或不写，则为平端面车削循环指令，如图 2-34 所示；否则，为锥端面车削循环指令，如图 2-35 所示。

4）该指令是针对毛坯材料为圆钢而开发的。

5）该指令可用于粗、精加工。粗加工时，动作 3 的圆柱面预留的精加工余量应适当减小，以减小精车时的切削宽度（即同时切削的切削刃长度）。

6）动作循环可描述为：1（R）→2（F）→3（F）→4（R）。其中动作 1、4 为快速移动，动作 2、3 为切削进给加工。

7）“单段”运行方式下，每按一次[循环起动]按钮，只能完成其中一个动作。

8）平端面车削循环一般通过改变切削终点 C 的 Z 坐标实现多刀加工。

9）锥端面车削固定循环锥度参数 R，可仅改变切削终点 C 的 Z 坐标实现等厚度多刀加工。也可固定终点坐标 C，仅改变锥度参数 R 实现变厚度多刀加工。

10）执行 G90、G92、G94 以外的 01 组的代码即取消 G94 固定循环。

11）根据 C 点与 A 点的关系，可实现外端面与内端面的循环加工，如 C 点在 A 点的左上角时为内（锥）端面加工。以锥端面加工、增量坐标编程为例，其关系如图 2-36 所示。

（2）平端面车削循环加工编程技巧　与圆柱面车削循环类似，平端面车削循环的编程技巧如下：

1）平端面车削循环 G94 同样可实现端面的粗、精车加工。

2）由于 G94 为模态指令，平端面车削循环指令编程进行多刀加工时，仅需写出变化的 Z 坐标即可。

3）由于平端面车削循环指令的主要切削面为端面，因此动作 3 的圆柱面精加工余量尽可能取小一点，一般取 0. 1mm 即可。

4）通过改变切削终点 C 的坐标，G94 指令同样可以实现阶梯端面的车削循环加工。

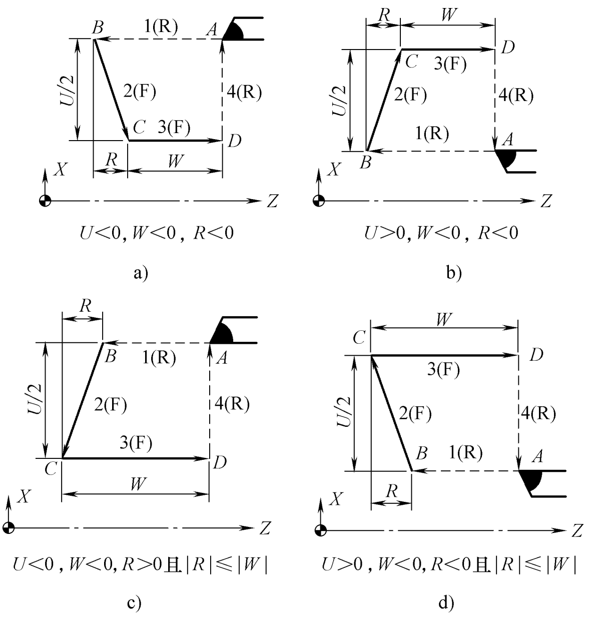


图 2-36 锥端面车削固定循环

a）、c）外锥端面加工 b）、d）内锥端面加工

试用 G94 指令加工图 2-37a 所示阶梯端面零件，毛坯外圆直径为 ϕ80mm，采用 2 号车刀，调用 2 号刀具补偿，恒线速度切削，切削速度为 100m/min，进给速度为 0. 2mm/r，工件坐标系设置在零件的右端面中心，起刀点 S 的坐标为（150，150），循环起点 A 的坐标为（85，2）。

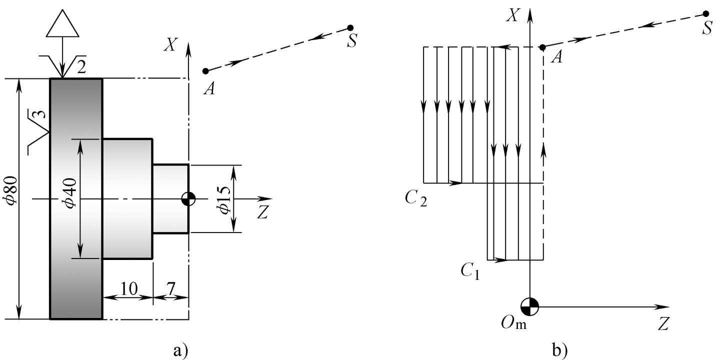


图 2-37 平端面车削循环示例

a）加工图样 b）刀路轨迹

加工程序如下：

O0214；	程序名
N10 G50 S1000；	主轴最高转速钳制设置
N20 G96 S100 M03；	恒线速度切削，切削速度为 100m/min，主轴正转
N30 T0202；	选择 2 号刀，调用 2 号刀具补偿，建立工件坐标系
N40 G00 X150. 0 Z150. 0；	刀具快速定位至起刀点 S
N50 X85. 0 Z2. 0 M08；	快速定位至固定循环的起点 A，开切削液
N60 G94 X15. 0 Z-2. 0 F0. 2；	指令平断面车削循环第 1 刀，进给速度为 0. 2mm/r

N70 Z-4.0；	第 2 刀
N80 Z-6.0；	第 3 刀
N90 Z-7.0；	第 4 刀，切削至终点坐标 C_1
N100 X40.0 Z-9.0；	车第二台阶面第 1 刀
N110 Z-11.0；	第 2 刀
N120 Z-13.0；	第 3 刀
N130 Z-15.0；	第 4 刀
N140 Z-17.0；	第 5 刀，切削至终点坐标 C_2
N150 G00 X150.0 Z150.0 M09；	快速退回到起刀点 S，关切削液
N160 T0200；	取消 2 号刀具补偿
N170 M30；	结束程序，返回程序头

注：本程序未考虑精加工，刀路轨迹如图 2-37b 所示。

（3）锥端面车削循环加工技巧讨论　与 G90 指令一样，锥端面车削循环指令的加工方案同样也存在等厚度分层加工与变厚度分层加工及其组合的加工方案，如图 2-38 所示。读者可参照表 2-1 自行对各方案的优缺点、编程技巧及应用进行总结。

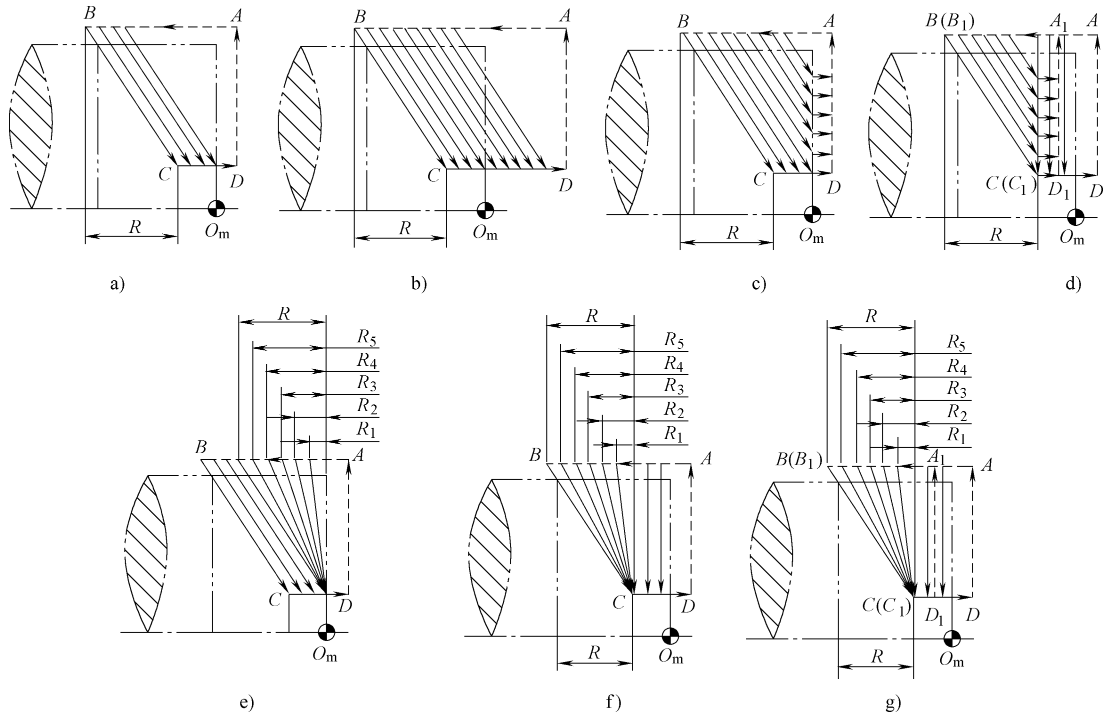


图 2-38　锥端面车削循环加工方案

a）～d）等厚度分层加工　e）～g）等厚度与变厚度组合分层加工

2.5.2　复合循环指令 G71～G73 与 G70 编程技巧

简单循环编程指令虽然比基本编程指令能简化程序结构，但其加工面的形状受到一定限制，只能加工单一几何特征的圆柱与圆锥面，对于形状更复杂的表面，如包含多段圆柱与圆

锥以及圆弧面等，就显得无能为力。为此，数控系统专门开发了相应的固定循环指令。如FANUC 0i 车削系统便开发了称为复合固定循环的粗加工指令 G71/G72/G73 以及配套的精加工指令 G70。另外，还有一对端面和圆柱面车槽的固定循环指令 G74/G75。

1. 圆柱面加工为主的粗车复合循环指令 G71

（1）G71 的指令格式　动作循环简图如图 2-39 所示，指令格式如下：

G71 U(Δd)R(e)；

G71 P(n_s)Q(n_f)U(Δu)W(Δw)F(f)S(s)T(t)；

N(n_s)…；
……；
F_ ；
S_ ；
T_ ；
N(n_f)…；

} 顺序号 n_s 到 n_f 的程序段,用于指定 $A \rightarrow A' \rightarrow B$ 的运动轨迹,也是精车加工形状的程序段,这段指令一般紧接着 G71 指令编写,描述零件表面的轮廓形状。

其中，Δd 是背吃刀量（半径指定），不带符号数，为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5132 设定，移动方向为 $A \rightarrow A'$；

e 是退刀量，为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5133 设定；

n_s 是精车加工程序第一个程序段的顺序号，即 $A \rightarrow A'$程序段；

n_f 是精车加工程序最后一个程序段的顺序号，即以 B 点为终点的程序段；

Δu 是 X 方向精加工余量（双面余量）的距离和方向；

Δw 是 Z 方向精加工余量的距离和方向；

f，s，t 是 G71 指令中的 F、S 或 T 功能，仅在粗车循环过程中有效，而包含在 n_s 到 n_f 程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

（2）编程技巧与禁忌

1）G71 指令适合于毛坯为圆柱体、长径比较大的轴类零件加工。

2）零件的 X 轴数值沿 Z 方向必须单调变化（递增或递减），有四种切削方式，如图 2-40所示。上面两图为外轮廓表面加工轨迹，下面两图为内轮廓表面的加工轨迹。注：① 实际应用中的某些数控系统允许轮廓线非单调变化；② FANUC 0i TD 系统已经可以允许 X 轴非单调变化。

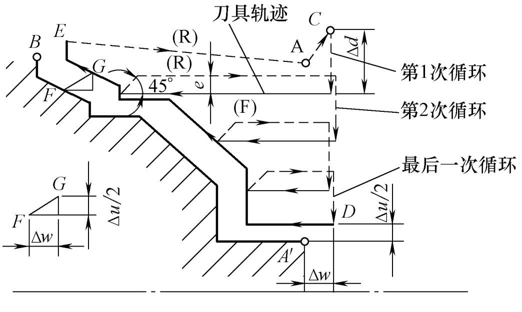


图 2-39　G71 指令的动作循环简图

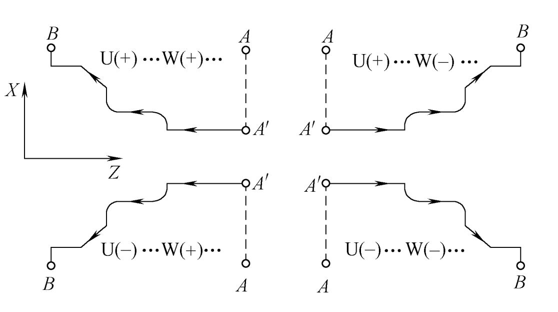


图 2-40　G71 指令的四种切削方式

3）顺序号 n_s 程序段（$A \rightarrow A'$）用 G00 或 G01 指令指定，该程序段不能有 Z 轴移动，甚至不得出现 Z 轴尺寸字 Z。如果需要，必须另起一个程序段指定。$A \rightarrow A'$段一般不切削，故用 G00 可提高加工效率。

4）顺序号 n_s 至 n_f 之间的程序段由基本编程指令编写，不能调用子程序。

5）指令中指定的 F、S 或 T 功能仅在粗车循环中有效，而包含在 n_s 到 n_f程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

6）用恒线速度切削控制时，在 n_s 至 n_f 程序段中指定的 G96 或 G97 无效，而是由 G71 指令之前的程序段指定的 G96 或 G97 有效。

7）A 点为循环起始点，由 G71 程序段之前的程序段指定。A'和 B 点分别为加工轮廓的起点与终点。C 点坐标程序中未指定，由数控系统根据 A'和 B 点坐标值、Δu、Δw 和 Δd 等自动计算并确定其坐标值。

8）G71 粗车循环最后一刀的运动轨迹（$D \rightarrow E$）是与编程轨迹（$A' \rightarrow B$）形状相同，位置由精加工余量 Δu 与 Δw 偏移确定的轨迹。如图 2-39 中编程轨迹上的 F 点偏离后的位置为 G 点，其两直角边的距离分别为 Δw 与 $\Delta u/2$。

（3）程序示例与分析　试用 G71 指令编程加工图 2-41 所示零件的外轮廓。已知毛坯外径为 ϕ40mm，工件坐标系选在零件右端面，刀具 T0101，粗车时，主轴转速为 600r/min，进给量为 0.3mm/r，精车时，主轴转速为 900r/min，进给量为 0.15mm/r，起刀点 S 为（200，100），循环起始点 A 为（42，2），背吃刀量为 2.0mm，退刀量为 1.0mm，径向精加工余量为 1.0mm，轴向精加工余量为 0.5mm。

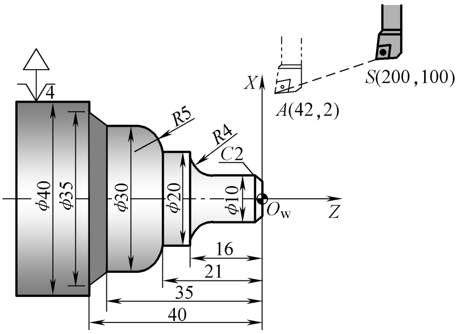


图 2-41　G71 指令加工示例零件图

参考程序如下：

O0215;	程序名
N10 G50 X200. Z100.;	G50 指令建立工件坐标系
N20 S600 M03;	主轴正转,转速为 600r/min
N30 T0101;	选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿
N40 G00 X42. Z2. M08;	快速移动到循环起始点 A,开切削液
N50 G71 U2. R1.;	G71 固定循环指令开始
N60 G71 P70 Q180 U1. W0.5 F0.3;	设置固定循环起、止段号及参数
N70 G00 X0 S900 F0.15;	轮廓加工起始行 n_s,设定精车切削用量
N80 G01 Z0;	进给进刀至端面
N90 X6.;	加工 ϕ10 端面
N100 X10. W-2.;	加工 C2 倒角
N110 Z-12.;	加工 ϕ10 外圆
N120 G02 X18. Z-16. R4.;	加工 R4 圆弧
N130 G01 X20.;	加工 ϕ20 端面
N140 Z-21.;	加工 ϕ20 外圆
N150 G03 X30. Z-26. R5.;	加工 R5 圆弧

N160 G01 Z-35.;	加工 ϕ30 外圆
N170 X35. Z-40.;	加工斜面至 ϕ35
N180 X40.;	加工 ϕ40 端面,轮廓加工结束
N190 G00 X200. Z100. M09;	快速退回起刀点 S,关切削液
N200 T0100;	取消 1 号刀具补偿
N210 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析:

1）本程序仅写出了 G71 粗车的加工程序，加工方式属图 2-40 左上角刀轨。

2）N70 程序段为 n_s 程序段，该段不允许有 Z 轴移动，即使写成“G00 X0 Z2. S900 F0.15”这种 Z 轴无移动的形式，系统都将报警，实际上是不允许有 Z 轴地址符字。

3）N70 程序段中的 S900 和 F0.15 两参数对 G71 指令无效。本程序执行时为 S600 和 F0.3。

4）本程序对应的刀具轨迹如图 2-42 所示。

下面再来看一个 **G71 指令的应用技巧**。以图 2-26 所示的单一圆柱面加工为例，前面介绍过用简单固定循环指令 G90 进行粗、精车的程序，这是各种资料中常见的程序。但用 G90 指令编程，切削终点 C 退出的动作段 $C\rightarrow D$ 属于无切深的多次切削，工件表面加工硬化和切削刃磨损严重。而这里谈到的复合固定循环指令 G71 的加工包含多段圆柱与圆锥以及圆弧面等的复杂轮廓，可想而知，当然能够加工单段直线的图 2-26 零件轮廓。参考程序如下：

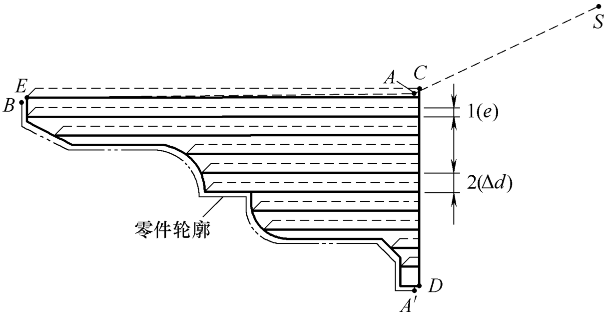


图 2-42　G71 指令加工示例刀具轨迹

O0216;	程序名
N10 G50 S1000;	主轴最高速度钳制设置
N20 G96 S80 M03;	恒限度切削,主轴正转,进给速度为 80mm/min
N30 T0101;	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N40 G00 X150. Z150.;	刀具快速定位至起刀点 S
N50 X104. Z3.;	快速移动至 G76 循环起始点
N60 G71 U2.5 R0.5;	G71 固定循环指令开始,并设置参数
N70 G71 P80. Q100. U0.8 W0.1 F0.25;	设置固定循环起、止段号及参数
N80 G00 X60. S100 F0.1;	轮廓加工起始行 n_s,精车切削参数设置
N90 G01 Z-80. F0.1;	
N100 X102.;	轮廓加工结束行 n_f
N110 G70 P80. Q100.;	指定 G70 精车固定循环
N120 G00 X150.0 Z150.0;	快速退回起刀点 S
N130 T0100;	取消 1 号刀具补偿
N140 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）该程序用 G71 + G70 对简单圆柱面进行粗 + 精加工，加工轨迹更加优化，比采用 G90 的程序 O0208 可减少较多的程序段。特别是加工直径与毛坯直径相差较大时效果明显。

2）该程序克服了 G90 循环指令加工时端面切削无加工余量多次加工的缺点。

3）该程序对应的刀具轨迹如图 2-43 所示。图中，背吃刀量 $\Delta d = 2.5$mm，每一刀在左端面基本不切削，仅是 G71 指令的最后有一刀沿轮廓的切削。另外，用 G70 进行了精车，提高了加工质量。

4）不足之处是 G71 指令的参数设置比 G90 复杂。

同样道理，图 2-28 所示的圆锥面零件，也可用 G71 + G70 指令进行加工。参考程序如下，刀具轨迹如图 2-44 所示，程序分析与上一示例基本相同。

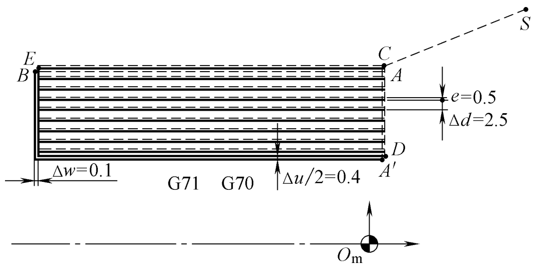


图 2-43　O0216 程序刀具轨迹

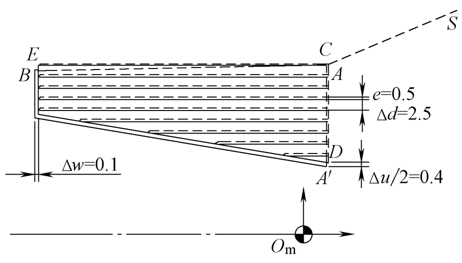


图 2-44　O0217 程序刀具轨迹

O0217；	程序名
N10 G97 S800 M03；	恒转速控制，主轴正转，转速为 800r/min
N20 T0101；	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N30 G00 X200. Z120. ；	刀具快速定位至起刀点 S
N40 X104. Z5. ；	快速移动至 G76 循环起始点 A
N50 G71 U2.5 R0.5；	G71 固定循环指令开始，并设置参数
N60 G71 P70. Q90. U0.8 W0.1 F0.25；	设置固定循环起、止段号及参数
N70 G00 X58.75 S1000 F0.1；	轮廓加工起始行 n_s，精车切削参数设置
N80 G01 X80. Z-60. ；	
N90 X102. ；	轮廓加工结束行 n_f
N100 G70 P70. Q90. ；	指定 G70 精车固定循环
N110 G00 X200. Z120. ；	快速退回起刀点 S
N120 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N130 M30；	程序结束，返回程序头

2. 端面加工为主的粗车复合循环指令 G72

G72 指令与 G71 指令同类，仅仅是主加工面不同，以加工平（锥）端面的盘类零件为主。

（1）G72 的指令格式　动作循环简图如图 2-45 所示，指令格式如下：

G72 W(Δd)R(e)；

G72 P(n_s)Q(n_f)U(Δu)W(Δw)F(f)S(s)T(t)；

N(n_s)…；
……
F_ ；
S_ ；
T_ ；
N(n_f)…；

顺序号 n_s 到 n_f 的程序段，用于指定 $A \to A' \to B$ 的运动轨迹，也是精车加工形状的程序段，这段指令一般紧接着 G72 指令编写，描述零件表面的轮廓形状。

其中，Δd 是背吃刀量，不带符号数，为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5132 设定，移动方向为 $A \to A'$；

e 是退刀量，为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5133 设定；

n_s 是精车加工程序第一个程序段的顺序号，即 $A \to A'$ 程序段；

n_f 是精车加工程序最后一个程序段的顺序号，即以 B 点为终点的程序段；

Δu 是 X 方向精加工余量（双面余量）的距离和方向；

Δw 是 Z 方向精加工余量的距离和方向；

f、s、t 是 G72 指令中的 F、S 或 T 功能，仅在粗车循环过程中有效，而包含在 n_s 到 n_f 程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

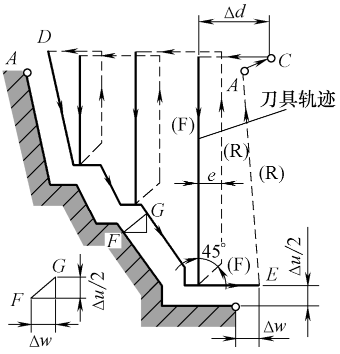


图 2-45　G72 指令的动作循环

（2）编程技巧与禁忌

1）G72 指令适合于毛坯为圆柱体、长径比较小的盘类零件加工。

2）零件的 Z 轴数值沿 X 轴方向必须单调变化（递增或递减），有四种切削方式，如图 2-46所示。上面两图为外形表面加工轨迹，下面两图为内形表面的加工轨迹。注：① 实际应用中的某些数控系统允许轮廓线非单调变化；② FANUC 0i TD 系统已经可以允许 Z 轴非单调变化。

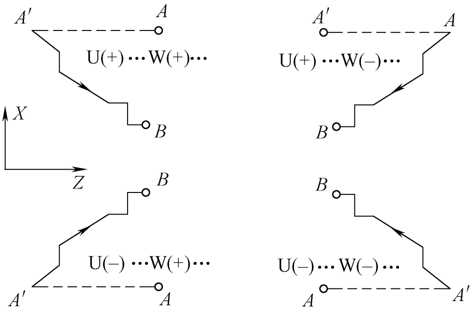


图 2-46　G72 的四种切削方式

3）顺序号 n_s 程序段（$A \to A'$）用 G00 或 G01 指令指定，该程序段不能有 X 轴移动，甚至不得出现 X 轴尺寸字 X。如果需要，必须另起一个程序段指定。$A \to A'$ 段一般不切削，故用 G00 可提高加工效率。

4）顺序号 n_s 至 n_f 之间的程序段由基本编程指令编写，不能调用子程序。

5）指令中指定的 F、S 或 T 功能仅在粗车循环中有效，而包含在 n_s 到 n_f 程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

6）用恒线速度切削控制时，在 n_s 至 n_f 程序段中指定的 G96 或 G97 无效，而是由 G72 指令之前的程序段指定的 G96 或 G97 有效。

7）A 点为循环起始点，由 G72 程序段之前的程序段指定。A'和 B 点分别为加工轮廓的起点与终点。C 点坐标程序中未指定，由数控系统根据 A'和 B 点坐标值、Δu、Δw 和 Δd 等自动计算并确定其坐标值。

8）G72 粗车循环最后一刀的运动轨迹（$D \to E$）是与编程轨迹（$A' \to B$）形状相同，位置由精加工余量 Δu 与 Δw 偏移确定的轨迹。如图 2-45 中编程轨迹上的 F 点偏离后的位置为 G 点，其两直角边的距离分别为 Δw 与 $\Delta u/2$。

注：G72 指令与 G71 指令的加工原理基本相同，仅主要切削表面不同。可对照学习，深刻理解。

3. 型面粗车复合循环指令 G73

型面粗车是类零件型面粗车的简称，用于加工毛坯为铸、锻件等外形与最终加工零件类似的零件型面。

（1）G73 的指令格式　动作循环简图如图 2-47 所示，指令格式如下：

```
G73 U(Δi)W(Δk)R(d);
G73 P(ns)Q(nf)U(Δu)W(Δw)F(f)S(s)T(t);
N(ns)… ;
……
F_ ;
S_ ;
T_ ;
N(nf)…;
```

（N(ns)…至 N(nf)…）顺序号 n_s 到 n_f 的程序段，用于指定 $A \to A' \to B$ 的运动轨迹，也是精车加工形状的程序段，这段指令一般紧接着 G72 指令编写，描述零件表面的轮廓形状。

其中，Δi 是 X 方向退刀量的距离和方向（半径指定），其实质是 X 方向的总加工余量，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5135 设定；

Δk 是 Z 方向退刀量的距离和方向，其实质是 Z 方向的总加工余量，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5136 设定；

d 是分割数，即粗车循环次数，为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5137 设定；

n_s 是精车加工程序第一个程序段的顺序号，即 $A \to A'$程序段；

n_f 是精车加工程序最后一个程序段的顺序号，即以 B 点为终点的程序段；

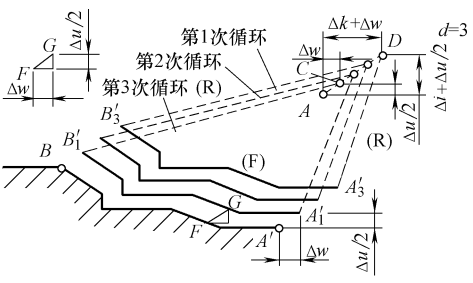


图 2-47　G73 指令的动作循环

Δu 是 X 方向精加工余量（双面余量）的距离和方向；

Δw 是 Z 方向精加工余量的距离和方向；

f，s，t 是 G71 指令中的 F、S 或 T 功能，仅在粗车循环过程中有效，而包含在 n_s 到 n_f 程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

（2）编程技巧与禁忌

1）G73 指令适合毛坯为铸、锻件等类零件型面的零件加工。

2）零件轮廓无单调变化要求，正是利用这样一种特性，该指令常用于加工轮廓非单调

变化的零件。其同样有四种切削方式，如图 2-48 所示。上面两图为外形表面加工轨迹，下面两图为内形表面的加工轨迹。

3）Δi、Δk 和 d 之间是有一定联系的，在同样 Δi 与 Δk 的条件下，切削次数 d 越多，则每一次循环切削的背吃刀量就越小。

4）顺序号 n_s 至 n_f 之间的程序段由基本编程指令编写，不能调用子程序。

5）指令中指定的 F、S 或 T 功能仅在粗车循环中有效，而包含在 n_s 到 n_f 程序段中的任何 F、S 或 T 功能只能在后续的 G70 精车循环过程中有效。

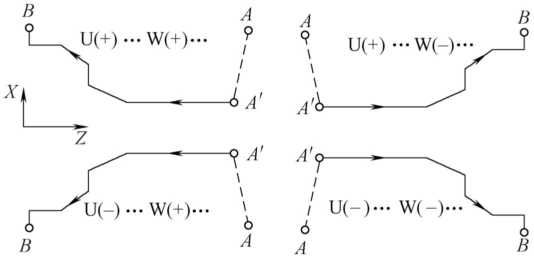


图 2-48　G73 的四种切削方式

6）用恒线速度切削控制时，在 n_s 至 n_f 程序段中指定的 G96 或 G97 无效，而是由 G73 指令之前的程序段指定的 G96 或 G97 有效。

7）A 和 A'之间的刀具轨迹是在顺序号为 n_s 的程序段中指定的 G00 或 G01 指令，一般以 G00 为好，可提高加工效率，且允许两轴同时移动。

8）A 点为循环起点，由 G73 程序段之前的程序段指定。C、D 点的坐标，G73 指令中没有直接给出，其中 C 点由 Δu、Δw 确定，D 点由 Δu、Δw 和 Δi、Δk 确定，具体坐标由系统根据 A 点坐标计算确定。

9）G73 粗车循环的切削轨迹 $A'_i \rightarrow B'_i$ 是一条条与零件最终形状相似的轨迹。其第一条 $A'_1 \rightarrow B'_1$ 位置由 Δu 与 Δw 偏移确定，最后一条移动轨迹由编程轨迹偏移获得，如图 2-47 中编程轨迹上的 F 点偏移后的位置为 G 点，其两直角边的距离分别为 Δw 与 $\Delta u/2$，后面若干条则由 Δi、Δk 和 d 计算偏移确定。

（3）程序示例与应用技巧　试用 G73 指令编程加工图 2-49 所示零件的外轮廓。假设毛坯为 ϕ30mm 的棒料和单面加工余量为 2mm、端面加工余量为 1mm 的锻件两种，加工刀具为 T0101。假设零件已经完成端面加工，工件坐标系建立在零件端面，试编程并分析车削工序。

工艺分析：由于存在内凹的 R20 圆弧，造成轮廓线非单调变化，因此，可以考虑用 G73 指令加工。图 2-50 所示为工艺分析简图。

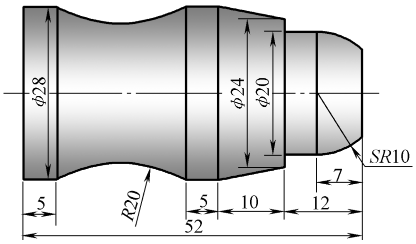


图 2-49　G73 指令加工示例零件图

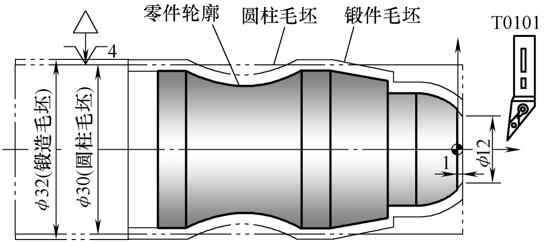


图 2-50　工艺分析简图

程序起刀点 S 坐标为（160，100），循环起始点 A 的坐标为（60，10），加工程序如下：

```
O0218;(圆柱毛坯)
N10 T0101;
N20 G00 X160. Z100. ;
N30 G97 G99 S800 M03;
N40 G00 X60. Z10. M08;
N50 G73 U6. W0.5 R7;
N60 G73 P70 Q150 U0.6 W0.1 F0.2;
N70 G00 X12. Z1. S1200;
N80 G03 X20. Z-7. R10 F0.1;
N90 G01 Z-12. ;
N100 X24. ;
N110 X28. Z-22;.
N120 Z-27. ;
N130 G02 X28. Z-47. R20;
N140 G01 Z-57. ;
N150 X31. ;
N160 G70 P70 Q150;
N170 G00 X160. Z100. M09;
N180 T0100;
N190 M30;
```

```
O0219;(锻件毛坯)
N10 T0101;
N20 G00 X160. Z100. ;
N30 G97 G99 S800 M03;
N40 G00 X60. Z10. M08;
N50 G73 U3. W1.0 R3;
N60 G73 P70 Q150 U0.6 W0.1 F0.2;
N70 G00 X12. Z1. S1200;
N80 G03 X20. Z-7. R10 F0.1;
N90 G01 Z-12. ;
N100 X24. ;
N110 X28. Z-22;.
N120 Z-27. ;
N130 G02 X28. Z-47. R20;
N140 G01 Z-57. ;
N150 X31. ;
N160 G70 P70 Q150;
N170 G00 X160. Z100. M09;
N180 T0100;
N190 M30;
```

应用技巧分析：

1）G73 指令可用于轮廓非单调变化的零件加工。

2）以上两程序的加工轨迹如图 2-51 和图 2-52 所示。可明显看出圆柱毛坯的加工刀数（7 刀）多于锻件毛坯（3 刀）；即 G73 适合于铸件、锻件毛坯。

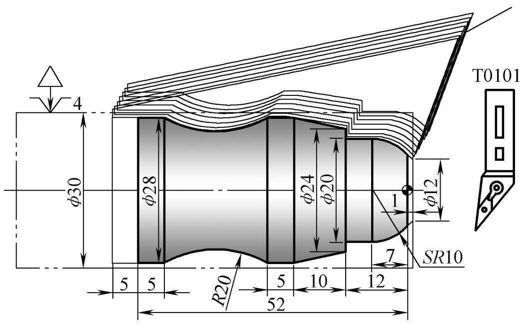


图 2-51　圆柱毛坯型面粗、精车加工轨迹（1）

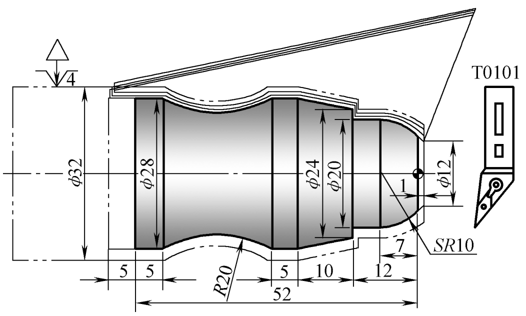


图 2-52　锻件毛坯型面粗、精车加工轨迹

3）G73 指令加工圆柱毛坯零件虽然空刀较多，但不失为一种简化编程的加工方法，单件生产时可以考虑。

4）以上程序为同一把刀具加工的 G73 + G70 的型面粗车工艺。

5）零件轮廓起点 *A′*是零件轮廓 *SR*10 顺势延伸 1mm 的点。轮廓终点 *B* 多切出了切断长度。

6）针对 G73 指令圆柱毛坯加工零件空刀多、效率低的问题，这里提出一种新的编程思

路供参考。该编程思路是：先用 G71 指令忽略非单调变化部分加工，然后用 G73 专门加工非单调变化部分。具体如下：

图 2-53 所示为工艺规划图，加工程序如下，刀具轨迹参见图 2-54。

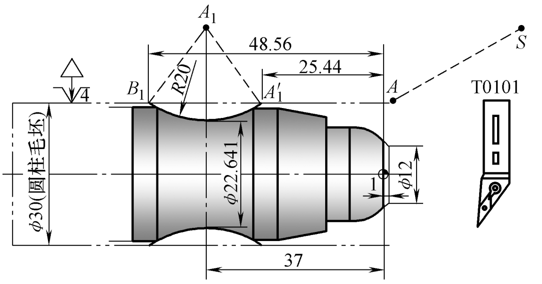


图 2-53　工艺规划图

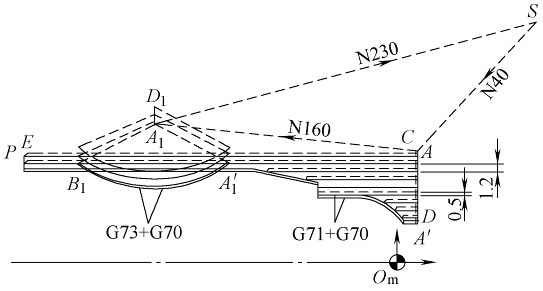


图 2-54　圆柱毛坯型面粗、精车加工轨迹（2）

O0220;	程序名
N10 T0101;	选用 1 号刀,调用 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G00 X160. Z100. ;	快速定位至起刀点 *S*
N30 G97 G99 S800 M03;	主轴正转,转速为 800r/min
N40 G00 X34. Z3. M08;	快速定位至 G71 循环起始点 *A*,开切削液
N50 G71 U1. 2 R0. 5;	指定 G71 粗车固定循环指令及参数
N60 G71 P70 Q140 U0. 6 W0. 1 F0. 2;	
N70 G00 X12. S1200;	G71 固定循环指令的 n_s 程序段
N80 G01 Z1. F0. 1;	
N90 G03 X20. Z-7. R10;	
N100 G01 Z-12. ;	
N110 X24. ;	
N120 X28. Z-22;.	
N130 Z-57. ;	
N140 X32. ;	G71 固定循环指令的 n_f 程序段
N150 G70 P70 Q140;	指定 G70 精车固定循环精车外圆柱部分
N160 G00 X42. 641 Z-37. ;	快速定位置 G73 固定循环起始点 A_1
N170 S800;	保持粗车主轴转速
N180 G73 U3. 68 W0 R3;	指定 G73 粗车固定循环指令及参数
N190 G73 P200 Q210 U0. 6 W0 F0. 2;	
N200 G00 X30. Z-25. 44 S1200;	G73 固定循环指令的 n_s 程序段
N210 G02 Z-48. 56 R20. F0. 1;	G73 固定循环指令的 n_f 程序段
N220 G70 P200 Q210;	指定 G70 精车固定循环精车凹圆弧部分
N230 G00 X160. Z100. M09;	快速返回起刀点 *S*
N240 T0100;	取消 1 号刀具补偿
N250 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）由图 2-54 可以清楚地看出，即使是圆柱毛坯，其空刀现象仍明显减少。

2）注意到 G71 指令的 n_s 程序段不允许有 *Z* 轴移动，因此，本例用两个程序段（N70 和 N80）从固定循环的起点 *A* 移动至 *SR*10 圆弧延伸 1mm 的位置处。

4. 与粗车循环 G71/G72/G73 配套的精车复合循环指令 G70

（1）G70 的指令格式　G70 是与 G71/G72/G73 三种粗加工循环指令配套的精车复合循环指令，用于切除 G71/G72/G73 粗车后留下的精加工余量。其指令格式如下：

G70 P（n_s）Q（n_f）；

其中，n_s 是精加工程序第一个程序段的顺序号；

n_f 是精加工程序最后一个程序段的顺序号。

（2）编程与应用技巧

1）G70 指令中的 n_s 和 n_f 就是相对应的粗车循环指令 G71/G72/G73 中的 n_s 和 n_f，两者必须相呼应。

2）G71/G72/G73 程序段中规定的 F、S 和 T 功能无效，但能执行 G71/G72/G73 指令后 n_s 与 n_f 之间程序段中的 F、S 和 T 功能。

3）G70 到 G73 中 n_s 到 n_f 间的程序段均不能调用子程序。

4）G70 循环指令运行结束后，系统执行 G70 程序段的下一个程序段。

（3）G70 指令的应用示例

1）若在前述程序 O0215 的程序段 N180 与 N190 之间增加一个程序段 N185 G70 P70 Q180，则可实现用一把刀进行粗、精车加工。

2）同样，若将程序 O0215 的程序段 N200 至 N210 之间增加程序段 N201 ~ N209 五个程序段，即可改造成为粗、精车两把刀具（T0100 和 T0202）进行粗、精车固定循环加工的程序。改进程序如下：

O0215；	程序名
N10 G50 X200. Z100.；	G50 指令建立工件坐标系
N20 S600 M03；	主轴正转,转速为 600r/min
N30 T0101；	选择 1 号刀,调用 1 号刀具补偿
N40 G00 X42. Z2. M08；	快速移动到循环起始点 *A*,开切削液
N50 G71 U2. R1.；	G71 固定循环指令开始
N60 G71 P70 Q180 U1. W0.5 F0.3；	设置固定循环起、止段号及参数
N70 G00 X0 S900 F0.15；	轮廓加工起始行,设定精车切削用量
……	……
N190 G00 X200. Z100. M09；	快速退回起刀点 *S*,关切削液
N200 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N201 <u>T0202</u>；	调用 2 号刀及 2 号刀具补偿
N202 <u>G00 X42. Z2. M08</u>；	快速定位至循环起点 *A*
N203 <u>G70 P70 Q180</u>；	指定精车循环
N204 <u>G00 X200. Z100. M09</u>；	快速退回起刀点 *S*,关切削液
N209 <u>T0200</u>；	取消 2 号刀具补偿
N210 M30；	程序结束,返回程序头

3）程序 O0218 和 O0219 是 G70 与 G73 应用的示例。

2.5.3 车槽复合循环指令 G74/G75 编程技巧

G74/G75 是一对切槽加工的复合循环指令，分别用于端面和圆柱面切槽。

1. 车槽复合循环指令 G74/G75 的指令格式

（1）端面车槽循环指令 G74 的指令格式　动作循环简图如图 2-55 所示，指令格式如下：

G74 R(*e*)；

G74 X/U_ Z/W_ P(Δ*i*)Q(Δ*k*)R(Δ*d*)F(*f*)；

其中，*e* 是回退量，一般取 0.5 ~ 1.0mm，该值为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No.5139 设定；

X/U _是 *B* 点（最后一个槽）的 *X* 轴绝对/增量坐标；

Z/W_是 *C* 点（槽的深度）的 *Z* 轴绝对/增量坐标；

Δ*i* 是 *X* 方向的每次移动量（即槽距），不带符号，一般为半径指定，单位为 μm；

Δ*k* 是 *Z* 方向的每次切深（即啄进距离），不带符号，单位为 μm；

Δ*d* 是刀具在切削底部的横向退刀量，单位为 mm，必要时可以设为 0；

f 是进给速度。

（2）圆柱面车槽指令 G75 的指令格式　动作循环简图如图 2-56 所示，指令格式如下：

G75 R(*e*)；

G75 X/U_ Z/W_ P(Δ*i*)Q(Δ*k*)R(Δ*d*)F(*f*)；

其中，*e* 同 G74；

X/U_是 *C* 点（即槽深）的 *X* 轴绝对/增量坐标；

Z/W_是 *B* 点（最后一个槽）的 *Z* 轴绝对/增量坐标；

Δ*i* 和 Δ*k* 与 G74 的意义对应，但移动坐标轴方向对调；

Δ*d* 作用同 G74；

f 同 G74。

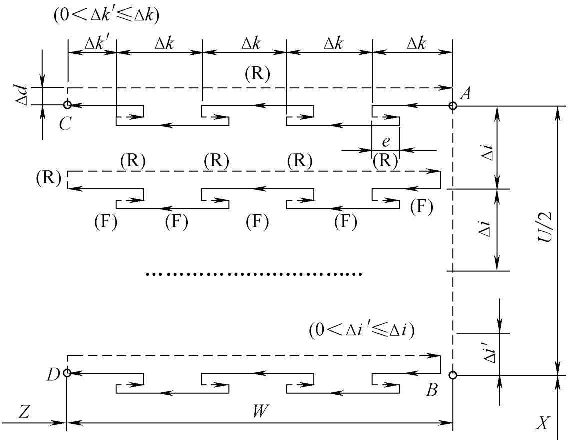


图 2-55　G74 指令动作循环简图

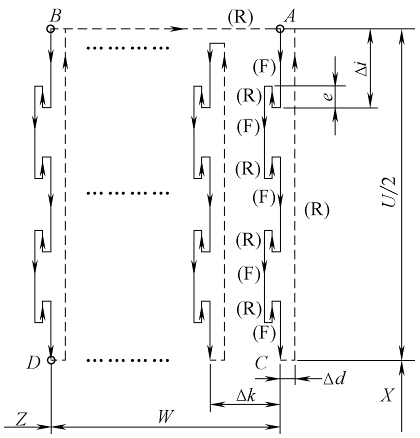


图 2-56　G75 指令动作循环简图

2. 编程技巧与禁忌

1）G74/G75 指令分别用于端面/圆柱面的车槽加工。其中，G75 可用于外圆/内孔圆柱面上的槽加工。

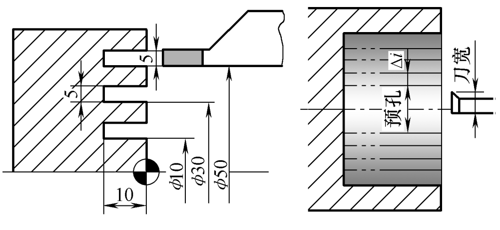
2）G74 指令中，当 Δi 大于切槽刀的宽度时为端面等距多槽加工，否则，为单个宽槽或镗孔加工，如图 2-57 所示，其中镗孔加工必须钻中心孔。

3）同理，G75 指令中，Δk 大于切槽刀的宽度时为圆柱面等距多槽加工，否则，为单个宽槽加工，如图 2-58 所示。

4）G74/G75 的切槽方式为啄式进给，目的是断屑，实际中可根据加工情况进行调整。

5）槽底横向对刀量 Δd 是为了退刀时减小摩擦，但对于加工刀宽的槽以及钻孔时，必须忽略（即设为 0），否则可能出现打刀的问题。

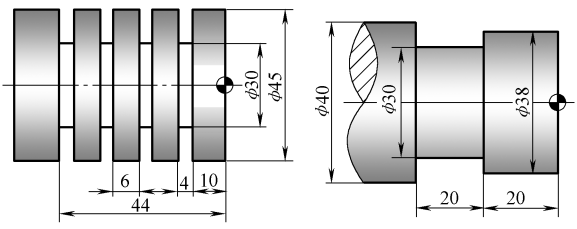
6）图 2-55、图 2-56 可看成是标准的车槽指令，可简化为端面啄式中心钻孔指令和圆柱面啄式车单槽指令。动作简图如图 2-59、图 2-60 所示，指令格式如下：



a)　　b)

图 2-57　G74 编程技巧

a）端面均布槽加工　b）端面镗孔加工



a)　　b)

图 2-58　G75 编程技巧

a）圆柱面均布槽加工　b）圆柱面宽槽加工

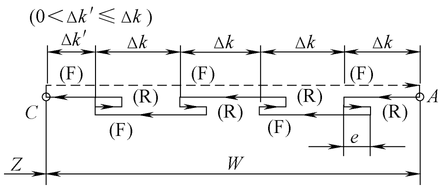


图 2-59　G74 端面钻中心孔动作循环简图

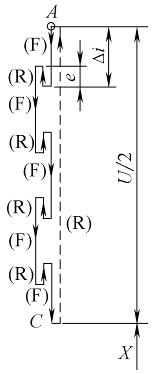


图 2-60　G75 圆柱面车单槽动作循环简图

G74 R(e)；（端面啄式钻中心孔）

G74 Z/W_ Q(Δk)F(f)；

G75 R(e)；（圆柱面啄式车单槽或切断）

G75 X/U_P(Δi) F(f)；

3. 程序示例与分析

（1）G74 多槽加工示例　利用 G74 指令加工图 2-57a 所示端面上的多槽，槽的宽度等于

切槽刀的宽度。参考程序如下：

O0221；	程序名
N10 G50 S650；	主轴最高转速钳制设置
N20 G96 S70 M03；	恒线速度控制，切削速度为70m/min，主轴正转
N30 T0101；	调用1号刀及1号刀具补偿，建立工件坐标系
N40 G00 X200. Z100.；	快速定位起刀点 *S*
N50 G00 X50. Z2.；	快速定位至循环起始点 *A*
N60 G74 R1.；	G74 循环车三个槽，退刀量为1mm
N70 G74 X10. Z-10. P10000 Q2000 F0.1；	G74 切槽参数设置
N80 G00 X200. Z100.；	快速退回起刀点 *S*
N90 T0100；	取消刀具补偿
N100 M30；	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：

1）N60 和 N70 是 G74 复合循环指令，其参数设置为：退刀量 $e=1\text{mm}$，X 轴移动量 $\Delta i=10000\mu\text{m}=10\text{mm}$（槽距），每次切深 $\Delta k=2000\mu\text{m}=2\text{mm}$（啄进距离）。

2）注意该程序槽车削的顺序是从外向内。

3）加工的刀具轨迹如图 2-61 所示。切槽顺序是从外向内共车了 3 条槽。显然，刀位点是车槽刀的下侧点，理论刀尖方向号为 3。

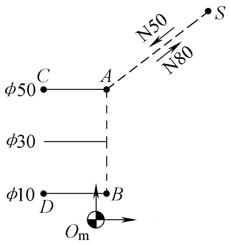


图 2-61 G74 多槽加工

（2）G74 指令镗孔示例 利用 G74 指令加工图 2-57b 所示的孔，T0101 刀为镗孔刀，T0202 刀为 $\phi8$ 麻花钻，加工工艺为：钻预孔 $\phi8$→镗内孔至尺寸。参考程序如下：

O0222；	程序名
N10 S500 M03；	主轴正转，转速为500r/min
N20 T0202；	调用2号刀及2号刀具补偿，建立工件坐标系
N30 G00 X200.0 Z200.0；	快速定位至起刀点 *S*
N40 G00 X0 Z2.0 M08；	快速定位至钻孔起点 A_2，开切削液
N50 G74 R1.；	G74 指令啄钻方式钻中心孔
N60 G74 Z-32.0 Q5000 F0.2；	G74 指令参数设置
N70 X200.0 Z200.0 M09；	快速返回起刀点 *S*，关切削液
N80 T0200；	取消2号刀具补偿
N90 T0101；	调用1号刀及1号刀具补偿，建立工件坐标系
N100 G00 X8.5 Z2.0 M08；	快速定位至 G74 循环起点 A_1，开切削液
N110 G74 R0；	G74 指令镗孔
N120 G74 X37.0 Z-30.0 P2000 Q32000 R0.2 F30；	G74 指令参数设置，7刀粗镗，1刀精镗
N130 G00 X200.0 Z200.0 M09；	快速返回起刀点 *S*，关切削液
N140 T0200；	取消2号刀具补偿
N150 M30；	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：

1）程序段 N50 和 N60 为简化的端面啄式中心钻孔指令，用于钻中心孔等，可有效断屑。

2）程序段 N110 和 N120 为标准的切槽指令，用于镗孔，由于啄进距离 $\Delta k=32000\mu m=32mm$，刚好等于孔深，因此镗孔时无啄式动作，这符合镗内孔的特点。

3）镗孔至孔底的横向退刀量 $\Delta d=0.2mm\geqslant 0$ 的设定可避免刀具退回时与加工表面的接触，有利于提高刀具寿命。

4）镗刀主切削刃的宽度必须大于每次的移动量 $\Delta i=2000\mu m=2mm$（槽距）。

5）加工的刀具轨迹如图 2-62 所示。图中标出了每一刀的直径值，其中最后一刀的加工余量为 0.5mm，正好符合精加工要求。该例理论刀尖方向号为 2。

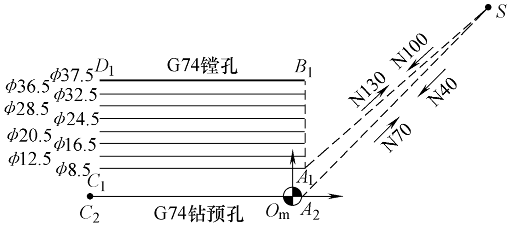


图 2-62　钻预孔—镗孔刀具轨迹

（3）G75 指令圆柱多槽加工示例　利用 G75 指令加工图 2-58a 所示的等间距槽，假设刀具宽度等于槽宽 4mm。参考程序如下：

O0223；	程序名
N10 S500 M03；	主轴正转,转速为 500r/min
N20 T0101；	选择 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N30 G00 X200. Z100.；	快速定位至起刀点 S
N40 X60. Z-14.；	快速定位至循环起点 A,右边第一槽位置
N50 G75 R1.0；	G75 外径切槽循环,车 4 个径向槽
N60 G75 X30. Z-44. P3000 Q10000 F0.1；	G75 循环参数设置
N70 G00 X200. Z100.；	快速退回至起刀点 S
N80 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N90 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）由于切槽刀宽度等于槽宽 4mm，所以未设置循环参数 R。

2）车多槽要求刀具横向移动距离（Δk）大于刀具宽度。

3）车槽时的啄式动作有利于断屑。

4）加工的刀具轨迹如图 2-63 所示。切槽顺序是从右向左共车了 4 条槽。显然，刀位点是车槽刀的左侧点，理论刀尖方向号为 3。

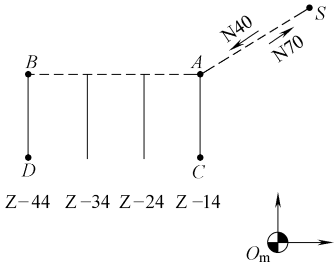


图 2-63　G75 车多槽刀具轨迹

（4）G75 指令圆柱宽槽加工示例　利用 G75 指令加工图 2-58b 所示的宽槽，假设刀具宽度为 4mm。参考程序如下：

O0224；	程序名
N10 T0101；	选择 1 号刀及 1 号刀具补偿
N20 S600 M03；	主轴正转,转速为 600r/min
N30 G54 G00 X160. Z160.；	G54 建立工件坐标系,快速定位至起刀点 S
N40 G00 X44. Z-40.；	快速定位至循环起点 A(右边第一槽位置)
N50 G75 R0.5；	G75 外径切槽循环,车宽槽

```
N60 G75 X30. Z-24. P3000 Q3500 F0.1;      G75 循环参数设置
N70 G00 X160. Z160.;                      快速退回至起刀点 S
N80 T0100;                                取消 1 号刀具补偿
N90 M30;                                  程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析:

1）G75 指令车宽槽要求刀具横向移动距离（Δk）小于刀具宽度。

2）G75 指令车出的槽底质量稍差。

3）加工的刀具轨迹如图 2-64 所示。可见前 5 刀均是按参数 Q3500 移动 3.5mm，第 6 刀则是按槽宽 20mm（即 D 点坐标 Z-20）由系统自动计算出移动距离 2mm。该例刀位点仍然为左侧点。

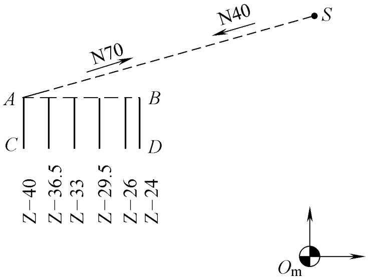


图 2-64　G75 车宽槽刀具轨迹

（5）G75 简化指令切断加工示例　利用 G75 简化指令编写一个切断加工程序，假设切断处直径为 ϕ40，起刀点 S 坐标为（160，160），循环起点（即切断点）坐标为（45，－40）。参考程序如下：

```
O0225;                                    程序名
N10 T0404;                                选择 4 号刀及 4 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 M03 S600;                             主轴正转,转速为 600r/min
N30 G00 X160.0 Z160.0;                    快速定位至起刀点 S
N40 X45.0 Z-40.0;                         快速定位至循环起点 A,即切断起点
N50 G75 R1.0;                             G75 外径切断循环
N60 G75 X-0.2 P5000 F0.2;                 G75 循环参数设置
N70 G00 X160.0 Z160.0;                    快速退回至起刀点 S
N80 T0400;                                取消 4 号刀具补偿
N90 M30;                                  程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析:

1）G75 简化指令参数，退刀量 $e = 1.0$mm，每次进刀量 $\Delta i = 5000\mu m = 5$mm。

2）用 G75 简化指令进行切断，其切断过程是啄式进行，可有效断屑，比用 G01 直接进刀切断效果好得多，推荐使用。

3）关于切断点，程序中给出的是 X-0.2，实际中，若仅是切断，另有车断面工序的话，即使是 X1 ~ X2，也是能够切断的，且刀尖过端面中心（工件轴线）很容易出现刀尖崩刃的现象，这一点在实际加工中经常出现。

4）加工程序的刀具轨迹如图 2-65 所示。可以看出啄进进刀的深度为 5mm，共进了 5 刀，其中最后一刀仅剩下 2.6mm。

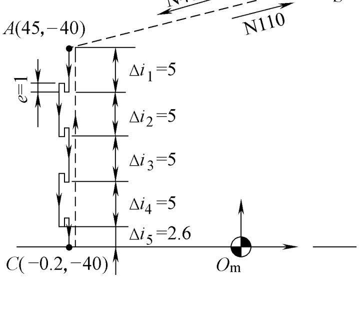


图 2-65　G75 切断刀具轨迹

2.5.4　复合循环指令综合编程示例

零件图样如图 2-66 所示，试以复合循环指令为主编写加工程序。

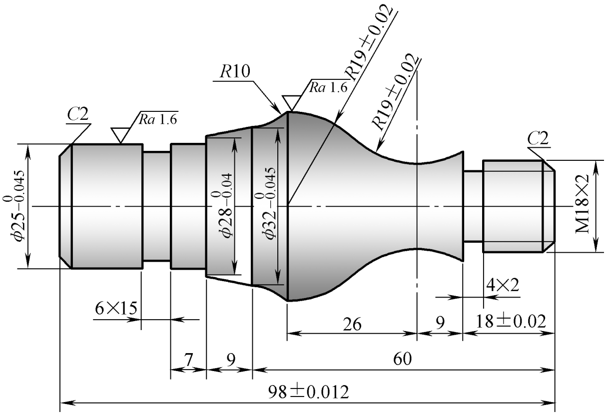
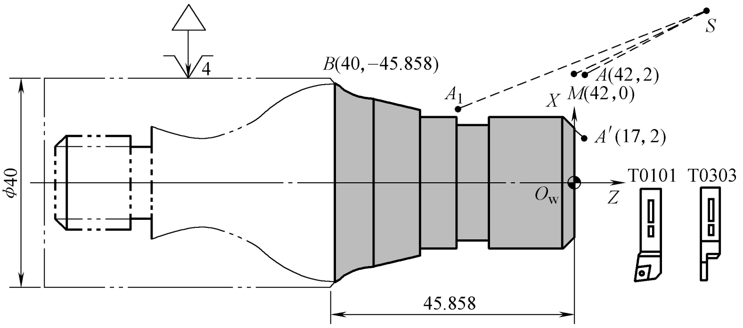
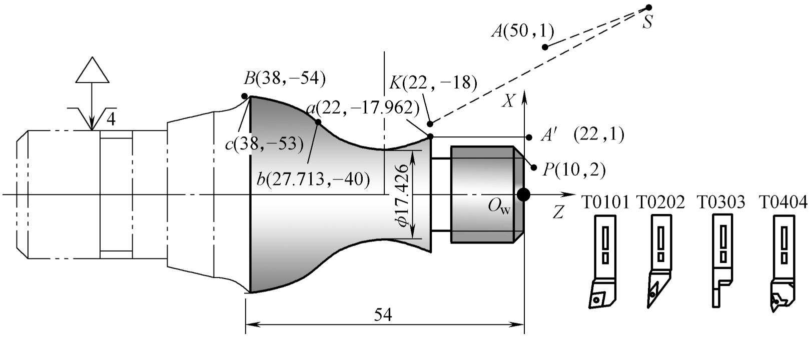


图 2-66　复合固定循环综合编程示例图样

图 2-67 所示为其加工工艺方案。图 2-67a 所示为采用 G71 + G70 指令加工轮廓，采用 G75 指令加工宽槽，假设切槽刀宽度为 4mm。图 2-67b 所示为采用 G73 + G70 指令加工曲线轮廓，采用 G92 指令加工螺纹，螺纹外径单独一刀加工。刀具及其编号如图所示。



a)



b)

图 2-67　加工工艺方案

a）左侧　b）右侧

参考程序如下所示：

O0226；	程序名(左侧加工程序)
N10 S600 M03；	主轴正转，转速为600r/min
N20 T0101；	选择1号刀及1号刀具补偿，建立工件坐标系
N30 G00 X160. Z200.；	快速定位至起刀点 S
N40 X42. Z0 M08；	快速移动至车端面起点 M
N50 G01 X-0.2 F0.15；	车端面
N60 G00 X42. Z2.；	快速移动至车 G71 循环起点 A
N70 G71 U1.5 R0.6；	G71 固定循环指令开始，并设置参数
N80 G71 P90 Q140 U0.8 W0.4 F0.2；	设置固定循环起、止段号及参数
N90 G42 G00 X17. S800 F0.1；	轮廓加工起始行 n_s，精车切削参数设置
N100 G01 X25. Z-2.；	
N110 Z-29.；	
N120 X28.；	
N130 X32. Z-38.；	
N140 G02 X40 Z-45.858 R10.；	轮廓加工结束行 n_f
N150 G70 P90 Q140；	精车循环 G70
N160 G40 G00 X160. Z200. M09；	快速返回起刀点 S
N170 T0100；	取消1号刀具补偿
N180 T0303；	选择3号刀及3号刀具补偿，建立工件坐标系
N190 S500；	设置切槽速度
N200 G00 X28. Z-22. M08；	快速定位至车宽槽起点 A_1
N210 G75 R0.5；	G75 外径切槽循环，车宽槽
N220 G75 X23.5 Z-20. P2000 Q2500 F0.2；	G75 循环参数设置
N230 G00 X160. Z200. M09；	快速返回起刀点 S
N240 T0300；	取消3号刀具补偿
N250 M30；	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：

G71 循环轮廓起点沿倒角顺势延伸，Z 轴距离 2mm。程序 O0226 的刀具轨迹如图 2-68 所示。

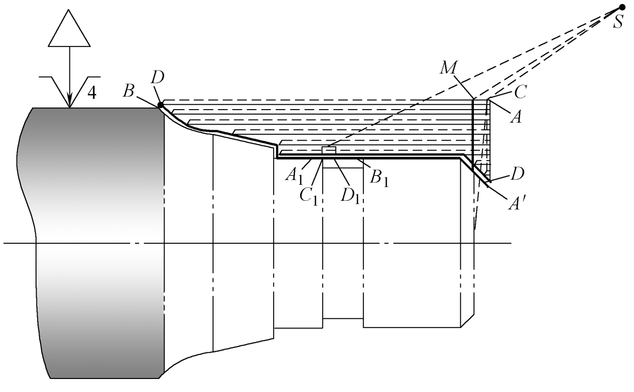


图 2-68 左侧加工刀具轨迹

O0227;	程序名(右侧加工程序)
N10 S600 M03;	主轴正转,转速为 600r/min
N20 T0101;	选择 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N30 G00 X160. Z200.;	快速定位至起刀点
N40 X42. Z0;	快速定位至车端面起点
N50 G01 X-0.2 F0.15;	车端面
N60 G00 X160. Z200.;	快速返回程序起刀点
N70 T0100;	取消 1 号刀具补偿
N80 T0202;	选择 2 号刀及 2 号刀具补偿,建立工件坐标系
N90 G00 X50. Z1. M08;	快速定位至曲面轮廓循环起点 A
N100 G73 U11.5 W0 R8;	G73 固定循环指令开始,并设置参数
N110 G73 P120 Q160 U0.8 W0 F0.2;	设置固定循环起、止段号及参数
N120 G42 G00 X22. Z1. S800 F0.1;	轮廓加工起始行 n_s,精车切削参数设置
N130 G01 X22 Z-17.962;	
N140 G02 X27.713 Z-40 R19.;	
N150 G03 X38. Z-53. R19.;	
N160 G01 Z-54.;	轮廓加工结束行 n_f
N170 G70 P120 Q160;	精车循环 G70
N180 G40 G00 X160. Z200.;	快速返回起刀点
N190 T0200;	取消 2 号刀具补偿
N200 T0101;	选择 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N210 G00 X10. Z2.;	快速移动至螺纹外径切削起点
N220 G01 X18. Z-2. F0.2;	车螺纹倒角
N230 Z-18.;	车螺纹外径
N240 X20.;	切出
N250 G00 X160. Z200.;	快速返回起刀点
N260 T0100;	取消 1 号刀具补偿
N270 T0303;	选择 3 号刀及 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N280 S500;	设置切槽速度
N290 G00 X22. Z-18. M08;	快速定位至切槽起点
N300 G01 X16. F0.15;	车退刀槽
N310 G00 X22.;	X 轴返回
N320 G00 X160. Z200.;	快速返回起刀点
N330 T0300;	取消 3 号刀具补偿
N340 T0404;	选择 4 号刀及 4 号刀具补偿,建立工件坐标系
N350 G00 X22. Z4.;	快速定位至车螺纹循环起点
N360 G92 X17.1 Z-16.0 F1.5;	G92 指令车螺纹,第 1 刀
N370 X16.5;	第 2 刀
N380 X15.9;	第 3 刀
N390 X15.5;	第 4 刀
N400 X15.4;	第 5 刀
N410 G00 X160. Z200. M09;	快速返回起刀点
N420 T0400;	取消 4 号刀具补偿
N430 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

1）将曲面轮廓与螺纹外径分别加工，有利于控制尺寸，同时可减少 G73 的切削次数。

2）由于曲面轮廓有尺寸精度要求，故启用了刀尖圆弧半径补偿（程序段 N120）。

3）刀具轨迹如图 2-69 所示。

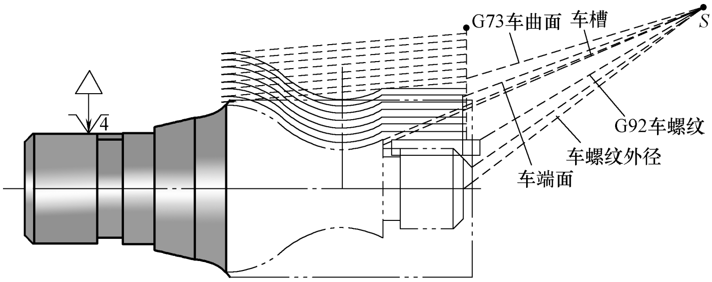


图 2-69　右侧加工刀具轨迹

2.6　螺纹车削加工

螺纹是机械工程中常见的几何特征之一，应用广泛。螺纹的加工工艺较多，如基于塑性变形的滚丝与搓丝，基于切削加工的车削、铣削、攻螺纹与套螺纹、螺纹磨削、螺纹研磨等。其中，螺纹车削是单件或小批量生产常用的加工方法之一。作为数控车床，螺纹车削加工是其基本功能之一。

2.6.1　螺纹特征分析

螺纹是在圆柱或圆锥母体表面上制出的沿着螺旋线形成的具有特定截面（牙型）的连续凸起部分。螺纹车削加工是通过切除相邻牙型之间的材料获得。螺纹特征如下：

（1）螺纹的分类　螺纹按母体形状不同分为圆柱螺纹、圆锥螺纹和端面（涡形）螺纹；按其在母体所处位置分为外螺纹、内螺纹；按其截面形状（牙型）分为三角形米制螺纹、管螺纹、矩形螺纹、梯形螺纹、锯齿形螺纹及其他特殊形状螺纹；按牙的大小分为粗牙螺纹和细牙螺纹等；按螺旋线方向分为左旋螺纹和右旋螺纹，右旋螺纹应用广泛；按螺旋线的数量分为单线螺纹、双线螺纹与多线螺纹（一般不超过 4 线）；按用途不同分为紧固螺纹、管螺纹、传动螺纹、专用螺纹等。

（2）螺纹的主要几何参数

1）大径（外螺纹 d 或内螺纹 D）：与外螺纹牙顶或内螺纹牙底相切的假想圆柱体直径。螺纹的公称直径即大径。

2）小径（外螺纹 d_1 或内螺纹 D_1）：与外螺纹牙底或内螺纹牙顶相切的假想圆柱体直径。

3）中径（外螺纹 d_2 或内螺纹 D_2）：母线通过牙型上凸起和沟槽宽度相等的假想圆柱体直径。

4）线数（n）：形成螺纹的螺旋线数量。

5）螺距（P）：相邻牙在中径线上对应两点间的轴向距离。

6）导程（P_h）：同一螺旋线上相邻牙在中径线上对应两点间的轴向距离，$P_h = Pn$。

7）牙型角（α）：螺纹牙型上相邻两牙侧间的夹角。

8）螺纹升角（ϕ）：中径圆柱上螺旋线的切线与垂直于螺纹轴线的平面之间的夹角，$\phi=\arctan(P_h/\pi d_2)$。

螺纹的公称直径一般以大径表示。螺纹已标准化，有米制和英制两种。国际标准采用米制，我国也采用米制。

2.6.2　螺纹车削方法分析

1. 螺纹车削加工特点

螺纹数控加工不同于轮廓加工，其特点表现为：螺纹加工属于成形加工，同时参加的切削刃较长，易出现啃刀与扎刀现象，一般均需多刀切削完成；为保证导程（或螺距）准确，必须要有合适的切入与切出长度；螺纹加工的牙型及牙型角基本由刀具形状保证，因此，刀具的形状与正确安装直接影响螺纹牙型的质量；螺纹加工时的进给量与主轴转速必须保持严格的传动比，即 $F=P_h$(mm/r)，因此，加工时禁止使用恒线速度控制；螺纹切削加工的切削速度一般不高，以不出现积屑瘤或刀具塑性损坏为原则。

2. 螺纹车削加工方式

螺纹存在右旋与左旋之分，其加工方式与主轴转向、刀具位置与进给方向有关。以外螺纹为例，其加工方式如图 2-70 所示。内螺纹的加工方式由读者自行分析。

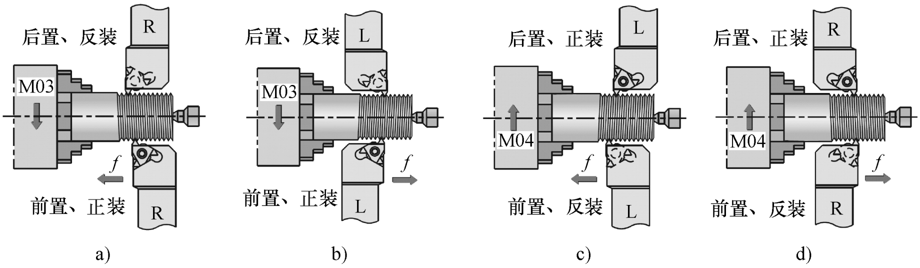


图 2-70　外螺纹加工方式

a)、d) 右旋螺纹　b)、c) 左旋螺纹

图 2-70a 所示为常见的右旋螺纹加工方式，主轴正转、前置正装或后置反装刀具、从右至左进给。若进给方向反向，则为左旋螺纹加工，如图 2-70b 所示。

图 2-70c 所示为左旋螺纹加工，主轴反转、前置反装或后置正装刀具、从右至左进给。若进给方向反向，则为右旋螺纹加工，如图 2-70d 所示。

3. 螺纹车削进刀方式

（1）进刀方式　螺纹加工必须多刀切削，其进刀方式有以下几种，如图 2-71 所示。

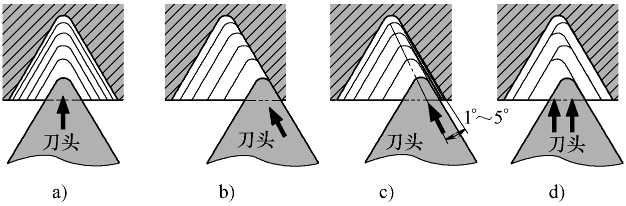


图 2-71　进刀方式

a）径向进刀　b）侧向进刀　c）改进式侧向进刀　d）左右侧交替进刀

1）径向进刀（图2-71a）是基础的进给方式，编程简单，左、右切削刃后刀面磨损均匀，牙型与刀头的吻合度高；但切屑控制困难，可能产生振动，刀尖处负荷大且温度高。适合于小螺距（导程）螺纹的加工以及螺纹的精加工。

2）侧向进刀（图2-71b）属较为基础的进刀方式，有专用的复合固定循环指令编程，可降低切削力，切屑排出控制方便；但由于纯单侧刃切削，左、右切削刃磨损不均匀，右侧后刀面磨损大。适合于稍大螺距（导程）螺纹的粗加工。

3）改进式侧向进刀（图2-71c）由于进刀方向的略微变化，使得右侧切削刃也参与一定程度的切削，一定程度上抑制了右侧后刀面的磨损，减小了切削热，改善了侧向进刀的不足。

4）左右侧交替进刀（图2-71d）的特点是左、右切削刃磨损均匀，能延长刀具寿命，切削排出控制方便；不足之处是编程稍显复杂。适用于大牙型、大螺距螺纹的加工，甚至可用于梯形螺纹的加工，在编程能力许可的情况下推荐使用。

另外，在加工梯形螺纹时还经常采用一种分层切削式进刀方式，参见图2-89和图2-91。

（2）进刀深度（又称切削深度）　螺纹加工多次切削的进刀深度选取方式有两种——恒切削面积与恒切削深度进刀，如图2-72所示。

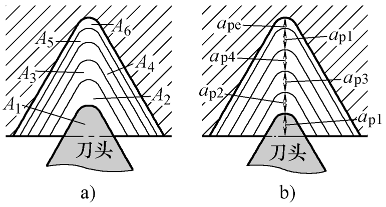


图2-72　进刀深度控制

a）恒切削面积　b）恒切削深度

1）恒切削面积进刀，每次进刀的切削面积相等，即A_i＝常数。该方法是数控车螺纹时最常用的方法，且通常加工效率最高；每次走刀的切削力均匀，有利于提高刀具寿命。

2）恒切削深度进刀，其每一刀的切削深度相等，即a_{pi}＝常数。该方式切屑厚度不变，可优化切屑形状。不足之处是走刀次数较多，仅作为一种补充方案。

4. 螺纹车削刀具角度的分析与控制

螺纹车削加工由于进给量较大（导程/r），因此，其工作角度受螺旋升角ϕ的影响较大。

图2-73、图2-74所示为某高速钢材料磨制的米制螺纹和梯形螺纹整体车刀简图。图中均明显看出左侧刃后角大于右侧刃后角，图2-74b还可看出左侧刃前角小于右侧刃前角。另外，径向后角也是必需的，这是刃磨螺纹车刀时需考虑的问题，具体数值可参阅相关资料，这里不详细讨论。

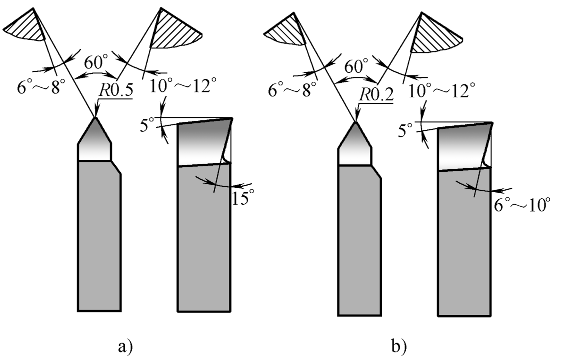


图2-73　高速钢公制螺纹车刀简图

a）粗车刀　b）精车刀

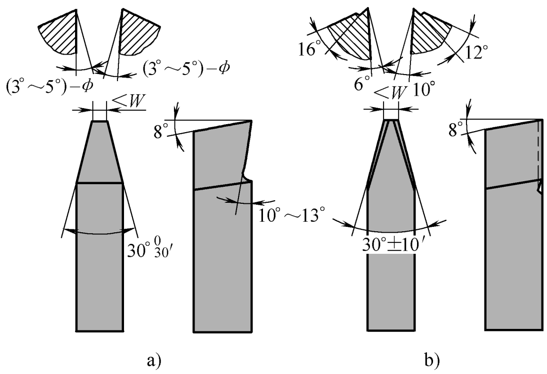


图2-74　高速钢梯形螺纹车刀简图

a）粗车刀　b）精车刀

对于机夹可转位式螺纹车刀，这个问题是通过刀片下不同角度的刀垫实现的，如图2-75所示。图2-75a所示为调整原理，通过刀片倾斜安装调整左、右侧刃的后角。图2-74b为刀垫调整示意图，刀垫以1°递增，从 −2° ~ +4°共7种规格，供不同螺纹升角螺纹加工的需要。

螺纹刀具的安装。首先，要求刀尖高度与主轴轴线等高（可借助于尾架顶尖高度对刀），误差控制在 ±0.15mm 左右；其次，必须保证两侧刃角平分线与工件轴线垂直，可借助对刀样板，如图2-76所示，以保证螺纹的牙型半角 $\alpha/2$。

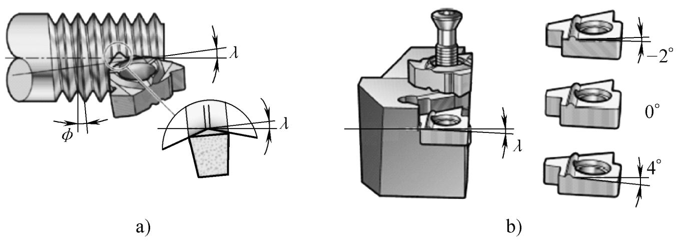


图2-75　机夹可转位车刀工作角度的调整
a）调整原理　b）刀垫调整示意图

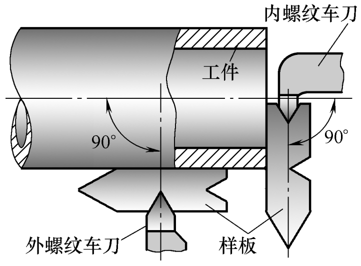


图2-76　对刀样板对刀示意图

5. 螺纹车削加工参数（切削用量与走刀次数）**的确定原则**

（1）螺纹车削的切削速度　与刀具材料有关，高速钢刀具一般采用较低的切削速度，最高速度以不出现积屑瘤为原则；而硬质合金刀具可考虑采用较高的切削速度，一般要求低速不出现积屑瘤，高速不出现刀具切削刃的塑性变形。螺纹车削的切削速度控制必须采用恒转速切削。

（2）螺纹车削的进给速度　无选择的余地，必须严格等于螺纹的导程。螺纹的进给速度单位为mm/r。若采用每分钟进给方式，则 $v_f = P_h n$（mm/min），即进给速度等于螺纹导程与主轴转速的乘积。

（3）螺纹车削时的背吃刀量与走刀次数　螺纹车削一般需多刀加工，多采用恒切削面积进刀方式，其背吃刀量递减。计算式如下：

1）总背吃刀量可按下式计算：

$$a_p = (0.61 \sim 0.62)P$$

2）总走刀次数可按表2-2的推荐值选取。

表2-2　螺纹加工总走刀次数推荐值

螺距/mm	0.50 ~ 0.80	1.00	1.25 ~ 1.50	1.75 ~ 2.00	2.50	3.00 ~ 3.50	4.00 ~ 5.00	5.50 ~ 6.00
次数 n_{ap}	4	5	6	8	10	12	14	16

3）每次走刀的背吃刀量可按下式计算：

$$\Delta a_{pn} = \frac{a_p}{\sqrt{n_{ap} - 1}}\sqrt{K}$$

式中，Δa_{pn}为第 n 刀的背吃刀量，单位为 mm；a_p为总背吃刀量（即牙型高度），单位为mm；n_{ap}为总走刀次数；K 的取值为：第1刀取0.3，其后的第 n 刀取 $n-1$。

例如某米制螺纹，螺距为2mm，牙型高度为1.21mm，拟切削6刀，试计算每刀的背吃刀量Δa_{pn}及其直径进刀量值。计算结果见表2-3。

表2-3 走刀顺序与背吃刀量计算结果

走刀顺序 n	背吃刀量计算值 Δa_{pn}/mm	实际背吃刀量（半径值） $\Delta a_{pn}-\Delta a_{p(n-1)}$/mm	实际进刀量（直径值） $2(\Delta a_{pn}-\Delta a_{p(n-1)})$/mm
第1刀	$\Delta a_{p1}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{0.3}=0.296$	0.296	0.592
第2刀	$\Delta a_{p2}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{2-1}=0.541$	0.245	0.49
第3刀	$\Delta a_{p3}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{3-1}=0.765$	0.224	0.448
第4刀	$\Delta a_{p4}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{4-1}=0.937$	0.172	0.344
第5刀	$\Delta a_{p5}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{5-1}=1.082$	0.145	0.29
第6刀	$\Delta a_{p6}=\frac{1.21}{\sqrt{6-1}}\times\sqrt{6-1}=1.21$	0.128	0.256

（4）第1刀与最后一刀背吃刀量的讨论　如下所述：

螺纹加工第一刀，由于刀具较尖，背吃刀量一般可取0.2～0.35mm。恒切削深度进刀方式，为兼顾后续的切削深度，背吃刀量多取0.12～0.18mm。

最后一刀属精加工，一般要求全刃切削，背吃刀量相对较小，一般可达0.05mm。对于高强度、高硬度、易加工硬化（如奥氏体不锈钢等）的工件材料，背吃刀量不宜小于0.08mm。

实际中，最后一刀可见无进给深度的空走刀，其主要用于修正加工过程中由于工艺系统弹性变形残留的加工余量（即修光），提高加工精度。这种加工方法刀具后刀面磨损严重，尽量少用。

（5）恒切削深度进刀方式（见图2-72b）背吃刀量与走刀次数确定方法　首先确定最后一刀的背吃刀量，然后按每刀0.12～0.18mm确定走刀次数。例如上文讨论的例子，总背吃刀量为1.21mm，若去除最后一刀的背吃刀量0.08mm，则剩余的背吃刀量分9刀加工时各刀的背吃刀量a_{pi}为（1.21－0.08）mm/9＝$0.12\dot{5}$mm。这里出现了除不尽的循环5，处理方式是第一刀略多一点，故最终结果为：$a_{p1}=0.13$mm，$a_{p(2\sim9)}=0.125$mm，$a_{p10}=0.08$mm。

（6）螺纹车削切入、切出长度的确定　由于机床进给伺服系统具有滞后特性，会在起始段和停止段出现螺纹螺距不规则现象，故应考虑合适的切入、切出长度，如图2-77所示。切入、切出长度的计算公式如下：

$$L_1=3.6\times\frac{P_h n}{1800},\ L_2=\frac{P_h n}{1800}$$

式中，P_h为螺纹导程，单位为mm；n为主轴转速，单位为r/min。

计算后的长度一般向上整数圆整。若需要快速估算可按$L_1\geqslant 2P_h$，$L_2\geqslant(1\sim1.5)P_h$计算。

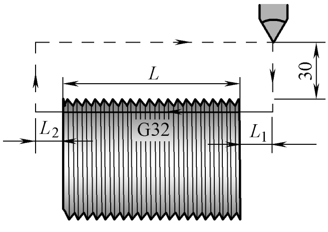


图2-77　切入、切出长度

6. 螺纹车削切削参数的选择技巧与禁忌

1）采用机夹可转位车刀加工时，尽可能采用厂家产品样本上推荐的参数。

2）表 2-2 推荐的走刀次数 n_{ap} 仅供参考，若工件材料较硬，则可适当增加走刀次数。

3）最后一刀的背吃刀量一般应小于 0.05mm。对于较硬的材料，或加工硬化明显的材料，如奥氏体不锈钢等，应大于 0.08mm。

4）对于工艺系统刚性较差的螺纹加工，最后一刀也可考虑无背吃刀量的加工，以提高加工精度，但这将导致刀具后刀面磨损加剧。

5）对于需要提高切削效率的加工，在工艺系统刚性允许的情况下，可选择小于表 2-2 推荐值的走刀次数 n_{ap}。当然是以牺牲刀具寿命为代价。

6）走刀次数与背吃刀量的选取不是一成不变的，应根据具体情况加以修正。

7）螺纹加工的主轴禁止使用恒线速度控制。

8）螺纹加工的切削热较大，一般应使用切削液冷却，并保证切削液可靠地喷射至加工区，如图 2-78 所示。

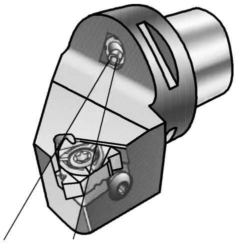


图 2-78　冷却示意图

7. 螺纹加工常见问题及解决办法

螺纹加工常见问题及解决方法见表 2-4。

表 2-4　螺纹加工常见问题及解决方法

问　　题	产 生 原 因	解 决 方 法
产生积屑瘤	1）中等偏低的切削速度 2）低碳钢或不锈钢材料的加工	1）继续降低或提高切削速度 2）低碳钢可调质处理，选择良好韧性的刀片，有 PVD 涂层的刀片更好
后刀面磨损过快	1）切削速度太高 2）横向进刀切深太浅 3）刀尖位于工件中心线以上太多	1）降低切削速度 2）减少进刀次数 3）调整装刀高度
左、右切削刃磨损不均	1）刀片刃倾角与螺纹的螺旋角不一致 2）侧向进刀方式不正确	1）更换合适的刀垫以获得正确的刃倾角 2）采用改进式侧向进刀方式
崩刃、破损	1）切削速度过慢 2）切削力过大 3）切屑控制不好，出现缠绕 4）刀尖安装高度偏差较大	1）提高切削速度 2）增加进刀次数，减小最大进刀量 3）选择合适的进刀方式，增加切削液压力，吹散切屑 4）调整刀具安装高度
刀具塑性变形	1）切削速度太高，切削温度过高 2）切削液供应不充分	1）降低切削速度 2）增加切削液供应，并对准加工区域冷却
螺纹表面质量差	1）切削速度太低 2）刀尖位于中心高之上 3）切屑控制较差	1）提高切削速度 2）调整刀具中心高度 3）变更合适的进刀方式
螺纹牙型不正确（牙型过平）	1）刀具安装中心高度误差太大 2）刀具磨损或破损	1）调整刀具但安装高度 2）更换刀具或转换切削刃
振动	1）工件或刀具的装夹不正确 2）切削参数选择不当 3）刀具安装高度误差偏大	1）调整工件或刀具的装夹状态 2）调整切削参数。如提高或降低切削速度，采用恒切削深度进刀加工 3）调整刀具的安装高度

2.6.3 螺纹加工指令 G32、G92 与 G76 分析

FANUC 0i Mate-TC 车削系统提供了三个螺纹直接编程指令——G32、G92 和 G76。

1. 螺纹加工基本指令 G32

（1）等螺距螺纹加工指令格式　如下所述：

G32 X(U)_ Z(W)_ F_ ;

其中，X(U)_ Z(W)_是螺纹切削终点的绝对（增量）坐标；F 是螺纹导程，单位为 mm/r。

加工螺纹的形式：圆柱螺纹、圆锥螺纹和端面（涡形）螺纹。

（2）基本加工指令 G32 应用技巧与禁忌

1）该指令类似于直线插补指令 G01，仅进给速度固定为导程，因此，每车一刀必须编写 4 个程序段，较为麻烦，故实际中应用不多。

2）G32 与 G92 等为同组的模态指令。

3）当指令中仅指定尺寸字 Z（W）_时为圆柱螺纹加工；仅指定尺寸字 X(U)_ 时为端面螺纹加工；同时指定 X(U)_Z(W)_为圆锥螺纹加工。

4）G32 指令程序段禁止指定倒角或圆角 *R* 简化编程。

5）G32 指令执行期间，禁止使用暂停指令 G04。

6）螺纹切削，禁止使用恒线速度控制指令 G96。

7）螺纹切削，禁止使用进给倍率调节功能，实际上机床已屏蔽该功能，即进给倍率调节功能无效。

8）螺纹切削期间，禁止从自动方式转变为手动工作方式。

以下为某 M48×2 螺纹加工的参考程序：

```
O0228;
N10 G50 X100. Z100. ;
N20 S300 M03 T0303;
N30 G00 X58. Z5. ;
N40X47.1;            第 1 次进刀
N50 G32 Z-52. F2. ;
N60 G00 X58. ;
N70 Z5. ;
N80X46.5;            第 2 次进刀
N90 G32 Z-52. F2. ;
N100 G00 X58. ;
N110 Z5. ;
N120X45.9;           第 3 次进刀
N130 G32 Z-52. F2. ;
N140 G00 X58. ;
N150 Z5. ;
N160X45.5;           第 4 次进刀
N170 G32 Z-52. F2. ;
N180 G00 X58. ;
N190 Z5. ;
N200X45.4;           第 5 次进刀
N210 G32 Z-52. F2. ;
N220 G00 X100. ;
N230 Z100. ;
N240 T0300;
N250 M30;
```

程序分析：G32 指令编程，每一刀必须用 4 个程序段完成，编程烦琐，但每一刀的背吃刀量可方便控制。

（3）G32 指令连续螺纹加工　连续螺纹加工指两螺纹加工程序段交界处能实现螺纹的连续过渡加工，并确保螺纹的连续性，如图 2-79 所示。

编程技巧：

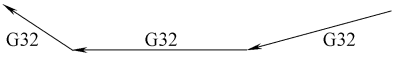


图 2-79　连续螺纹切削

1）连续螺纹加工功能能够实现中途改变螺距和形状的特殊螺纹加工，如编写螺纹倒角程序段。

2）连续螺纹加工功能允许在同一部分改变切削深度重复进行螺纹加工。

3）对于极微小的程序段相连续的螺纹加工，该功能可能无效。

4）螺纹连续功能可以与指令 G01 光顺过渡，加工出过渡较好的表面。

（4）G32 指令多线螺纹加工　G32 指令还具有多线螺纹加工功能，其指令格式如下：

G32 X(U)_ Z(W)_ F_Q_;

其中，Q_为螺纹加工的起始角，单位为 0.001°；其余同上。

起始角的取值范围为 0～360000；起始角（Q_）为非模态值，每次都必须指定，若不指定，则认为是 0。

双线螺纹起始角为 0°和 180°，参考程序如下：

```
G00 X40.0;
G32 W-38.0 F4.0 Q0;            加工第 1 线螺纹
G00 X72.0;
    W38.0;
    X40.0;
G30 W-38.0 F4.0 Q180000;       加工第 2 线螺纹
G00 X72.0;
    W38.0;
```

2. 螺纹加工简单固定循环指令 G92

（1）G92 指令格式　针对 G32 指令每加工一刀螺纹必须编写 4 个程序段的缺点，FANUC 0i 车削系统设计了 G92 指令，其指令格式如下，动作循环简图如图 2-80、图 2-81 所示。

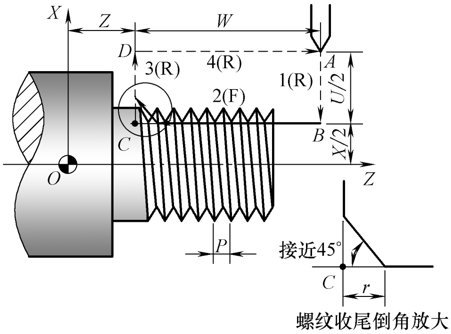


图 2-80　圆柱螺纹车削固定循环

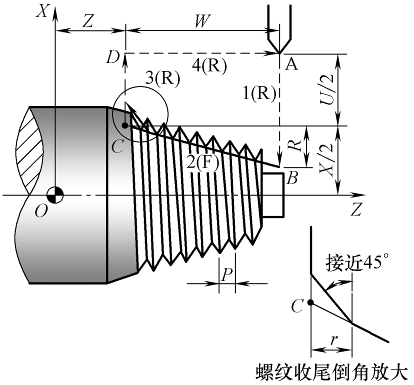


图 2-81　圆锥螺纹车削固定循环

G92 X(U)_ Z(W)_ F_Q_;　　　圆柱螺纹车削固定循环

或　G92 X(U)_ Z(W)_ R_ F_Q_;　　　圆锥螺纹车削固定循环

其中，X(U)_ Z(W)为圆柱（锥）螺纹切削终点 C 的绝对（增量）坐标值；F_为螺纹导程；

R_的含义同 G90 指令；Q_的含义同 G32（FANUC 0i TC 车削系统不具有参数Q_，不能进行圆周分线加工）。

注意，圆柱与圆锥螺纹车削循环指令的差异体现在锥度参数 R，当 $R=0$ 时便是圆锥螺纹。

（2）**编程技巧与禁忌**

1）G92 与 G90、G94 为同组的模态指令，其与 G32 等同属 01 组。

2）动作循环可描述为：1(R)→2(F)→3(R)→4(R)。其动作 2 为车螺纹加工，可设置接近 45°倒角的收尾，即意味着可以不用设置退刀槽。这个倒角动作可在 G92 指令中完成。

3）螺纹收尾倒角参数 r 由系统参数 No. 5130 指定，在 0. 1 ~ 12. 7 之间指定，最小单位为 0. 1P_h（导程），FANUC 0i TC 系统的倒角默认为 45°，而 FANUC 0iD 的车削系统则可通过参数 No. 5131 设定倒角范围 1° ~ 89°。

4）图 2-79、图 2-80 所示为外螺纹车削循环，若 C 点在 A 点的左上角，则为内螺纹车削循环。

5）G32 指令使用技巧与禁忌中的第 4）~8）条同样适用于 G92 指令。

6）由于 G92 指令用一个程序段即可完成 G32 指令需要至少 4 个程序段才能完成的动作，实际中应用广泛。

7）与 G90 指令的固定循环（见图 2-25）类似，G92 指令也有 4 种对称的进刀图形，可用于车削外（内）圆柱（锥）螺纹。

8）执行 G90、G92、G94 以外的 01 组 G 代码即取消 G90 固定循环。

9）指令中螺纹加工起始角 Q_是 FANUC 0i D 车削系统新增加的，在 FANUC 0i C 车削系统中没有该功能。利用该功能可进行多线螺纹的加工。

（3）G92 指令加工圆锥螺纹示例　加工简图及工艺计算如图 2-82 所示，假设已完成锥面加工，采用 T0303 号螺纹车刀，主轴转速为 300r/min，螺距为 1. 5 为 mm，拟分 4 刀加工，工件坐标系设置在零件右端面中心，起刀点 S 为（160，160），循环起点 A 为（70，5）。

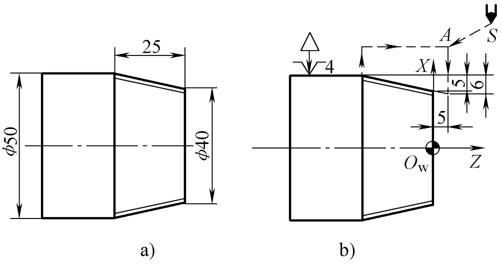


图 2-82　G92 指令车锥螺纹示例

a）加工简图　b）计算图及动作简图

参考程序如下：

O0229；	程序名称
N10 G97 S300 M03；	恒转速加工,主轴正转,转速为 300r/min
N20 T0303；	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N30 G00 X160. Z160. ；	快速定位至起刀点 S
N40 G00 X70. Z5. M08；	快速定位至固定循环起点 A,切削液开
N50 G92 X49. 2 Z-25. R-6. F1. 5；	圆锥螺纹固定循环第 1 刀加工
N60 X48. 6；	第 2 刀
N70 X48. 2；	第 3 刀
N80 X48. 04；	第 4 刀
N90 G00 X160. Z160. M09；	快速返回起刀点 S,切削液关
N100 T0300；	取消刀具补偿
N110 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：与 G32 指令相比，G92 指令明显简化了程序。

3. 螺纹加工复合固定循环指令 G76

（1）G76 指令格式与动作循环　G76 指令是螺纹加工的复合固定循环指令，其只需一个指令（两个程序段）即可完成螺纹多刀加工的全部过程，其加工程序比 G92 指令进一步简化。其指令格式如下，动作循环简图如图 2-83 所示。

G76 P(*m*)(*r*)(*a*)Q(Δd_{min})R(*d*)；

G76 X(U)_Z(W)_R(*i*)P(*k*)Q(Δd)F(*L*)；

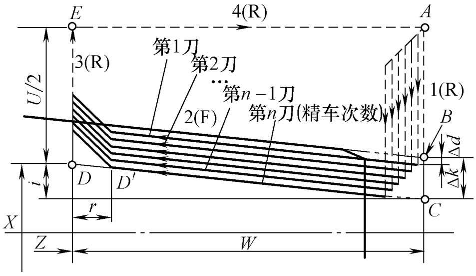


图 2-83　螺纹车削复合固定循环刀具轨迹

其中，m 是精加工重复次数（1～99）。该值为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5142 设定。

r 是螺纹尾部倒角量，由两位数（00～99）指定。数值单位为 0. 1*L*（导程），可由程序指定，也可由系统参数 No. 5130 设定。

a 是刀尖角度，由两位数指定，该值为模态值，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5143 设定。

Δd_{min}是最小背吃刀量钳制值，单位为 μm，由半径值指定，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5140 设定。

d 是精加工余量，单位为 μm，由半径值编程指定，可由程序指定，也可由系统参数 No. 5141 设定。

X(U)_Z(W)_是螺纹切削终点 *D* 的绝对（增量）坐标值，其中 X_相当于螺纹的小径。

i 是锥度螺纹半径差，半径值指定。若 $i=0$，则为圆柱螺纹，可省略。

k 是螺纹牙高（*X* 轴方向高度），单位为 μm。由半径值指定。

Δd 是第一刀切入深度（等于背吃刀量），单位为 μm。由半径值指定。

L 是螺纹导程值（指 *Z* 轴方向的螺纹导程）。

（2）G76 指令加工原理分析　G76 指令包含螺纹加工的全过程。粗车螺纹的切入方式为侧向进刀，进刀角度可在指令中指定，进刀深度控制为恒切削面积。精车螺纹的切入方式为径向进刀，精车次数与最小背吃刀量可控。其加工原理如图 2-84 所示。

1）粗车螺纹原理分析。按恒切削面积切深控制，即 A_c = 常数，存在等式：$\Delta d_n=\sqrt{n}\Delta d$，其中第一刀背吃刀量 Δd 由指令设定，后续的背吃刀量 Δd_n 由系统自动计算。并可能受 Δd_{min}钳制控制。

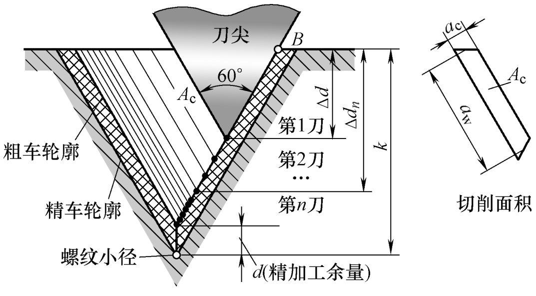


图 2-84　G76 指令加工原理

2）精车螺纹原理分析。为保证牙型的精确性，精车采用了径向进刀，进刀次数由指令设定，且受 Δd_{min}钳制控制。

3）动作循环分析。如图 2-83 所示，每一刀的动作仍然为 4 个动作：1（R）→2（F）→3（R）→4（R），*C* 点是一个理想位置点，

B 点是一个实际的转折点，动作 1(R) 实际是一条折线；切削运动轨迹 *C*→*D* 的终点包含一段收尾，可由指令指定；3(R) →4(R) 动作同 G92 指令。

(3) **使用技巧与禁忌**

1) 地址符 P 的参数指定。例如：若精车次数 $m=2$，螺纹收尾倒角 $r=1.2L$，刀尖角 $a=60°$，则参数指定为：P(m)(r)(a) = P021260。

2) 若指令中指定的刀尖角度 *a* 等于实际刀具的刀尖角度，为侧向进刀。若指令中指定的刀尖角度 *a* 小于实际刀具的刀尖角度，则为改进式侧向进刀。

3) 刀尖角度参数 *a* 指定时注意，若参数 No. 0001#3 (FCV) 设置为 0，角度参数 *a* 的指定值为 0、29、30、55、60、80；若参数 No. 0001#3 (FCV) 设置为 1，角度参数 *a* 的指定值为 0 ~ 120。

4) 最小背吃刀量钳制值 Δd_{min}，禁止取得太小，一般需大于 0. 05mm，对于加工硬化倾向明显的材料（如奥氏体不锈钢）需大于 0. 08mm。

5) 螺纹倒角量的设定范围为 $0.0L \sim 9.9L$。

6) 随着加工刀数 *n* 的增加，背吃刀量逐渐减小，若第 *n* 刀的背吃刀量 $(\Delta d_n - \Delta d_{n-1}) \leqslant \Delta d_{min}$时，其背吃刀量被钳制在 Δd_{min}。

7) 对于三角形米制螺纹，螺纹牙高可按螺距估算，即 $k=(0.61 \sim 0.62)P$(mm)，第一刀背吃刀量一般取 $\Delta d = 0.2 \sim 0.4$mm，螺距大则取偏大值。

8) 螺纹导程 *L* 指的是 *Z* 轴方向的导程，即使锥螺纹也是如此。

9) 与 G90 指令的固定循环（见图 2-25）类似，G76 指令也有 4 种对称的进刀图形，可用于车削外（内）圆柱（锥）螺纹。

10) 螺纹切削的注意事项与 G32 和 G92 基本相同。

11) G76 指令倒角量与 G92 指令的倒角量参数（No. 5130、No. 5131）共用设置。

(4) 程序示例与分析　试用 G76 指令编程，加工图 2-85 所示的螺纹 M30×2，假设 $L_1=4$mm，$L_2=2$mm，工件坐标系选在右端面。参考程序如下：

```
O0230;
N10 T0303;
N20 G97 S400 M03;
N30 G00 X32.0 Z4.0 M08;
N40 G76 P010060 Q100 R100;
N50 G76 X27.4 Z-27.0 R0 P1300 Q450 F2.0;
N60 G00 X200.0 Z100.0 M09;
N70 T0300 M05;
N80 M30;
```

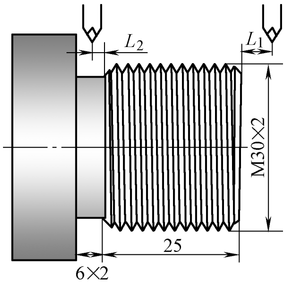


图 2-85　G76 指令加工示例

阅读以上程序，并分析以下几点，可检测自己对 G76 指令的理解深度。

1) 螺纹的切入与切出长度分别为多少？

2) 总共车了几刀？各刀的背吃刀量是多少？

3) 精车了几刀？

2.6.4　多线螺纹的车削技巧

多线螺纹是指沿两条或两条以上的螺旋线所形成的螺纹，该螺旋线在轴向等距分布。

1. 多线螺纹特征分析

多线螺纹一般包含两条或两条以上的螺旋线，螺旋线的数量称为线数（用 n 表示）。在垂直轴线的断面上，各螺旋线沿圆周是均匀分布的；在通过轴线的剖面上，同一条螺旋线上的相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离称导程（用 P_h表示），相邻螺旋线上相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离称螺距（用 P 表示），多线螺纹的导程被螺距所均分，导程、螺距与线数之间的关系是

$$P_h = Pn$$

多线螺纹的加工便是依据以上特征进行的，包括改变螺纹切削的起始角和改变螺纹切削的起始点两种方法。多线螺纹加工中的刀具进给量必须严格遵守主轴每转一转，刀具移动的距离为一个导程。

2. 改变螺纹切削起始角

改变螺纹切削起始角（又称初始角）车削多线螺纹是基于垂直轴线的断面上各螺旋线沿圆周均匀分布的几何特征进行的。改变螺纹起始角车削多线螺纹的方法又称圆周分线法。以下通过程序示例进行学习。

图 2-86 所示为某零件上的双线外螺纹 M24×Ph3P1.5-6g，即公称直径为 24mm，螺距为 1.5mm，导程为 3.0mm。工件坐标系设在工件端面中心。设其进刀次数 4 次，每刀背吃刀量（直径值）分别为 0.8mm、0.6mm、0.4mm、0.16mm，切入、切出长度分别为 4mm、2mm。

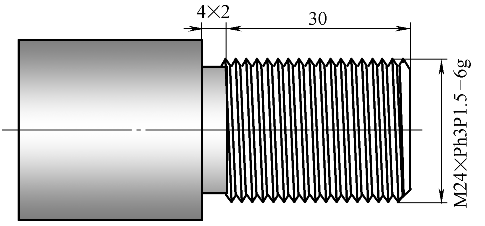


图 2-86　螺纹加工图示（1）

程序示例一：用多线螺纹加工指令 G32、圆周分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示的螺纹，各刀加工参数见表 2-5，参考程序如下：

表 2-5　各刀加工的直径值计算表　（单位：mm）

第 1 刀	0.8	24 − 0.8 = 23.2
第 2 刀	0.6	23.2 − 0.6 = 22.6
第 3 刀	0.4	22.6 − 0.4 = 22.2
第 4 刀	0.16	22.2 − 0.16 = 22.04

```
O0231;                          程序名称(圆周分线法车螺纹)
N10 T0303;                      选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08;         恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N40 X23.2;
N50 G32 Z-32.0 F3.0 Q0;         快速定位至螺纹切削的起始点 A
N60 G00 X30.0;
N70 Z4.0;                       第 1 线螺纹第 1 刀
N80 X22.6;
```

N90 G32 Z-32.0 F3.0 Q0;	
N100 G00 X30.0;	
N110 Z4.0;	第 1 线螺纹第 2 刀
N120 X22.2;	
N130 G32 Z-32.0 F3.0 Q0;	
N140 G00 X30.0;	
N150 Z4.0;	第 1 线螺纹第 3 刀
N160 X22.04;	
N170 G32 Z-32.0 F3.0 Q0;	
N180 G00 X30.0;	
N190 Z4.0;	第 1 线螺纹第 4 刀
N200 X23.2;	
N210 G32 Z-32.0 F3.0 Q180000;	
N220 G00 X30.0;	第 2 线螺纹第 1 刀
N230 Z4.0;	
N240 X22.6;	第 2 线螺纹第 2 刀
N250 G32 Z-32.0 F3.0 Q180000;	
N260 G00 X30.0;	
N270 Z4.0;	
N280 X22.2;	第 2 线螺纹第 3 刀
N290 G32 Z-32.0 F3.0 Q180000;	
N300 G00 X30.0;	
N310 Z4.0;	第 2 线螺纹第 4 刀
N320 X22.04;	
N330 G32 Z-32.0 F3.0 Q180000;	
N340 G00 X30.0;	快速返回起刀点 *S*,切削液关取消刀具补偿
N350 Z4.0;	
N360 X100.0 Z100.0 M09;	程序结束,返回程序头
N370 T0300;	
N380 M30;	

程序示例二：用简单固定循环指令 G92、圆周分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示螺纹的参考程序：

O0232;	程序名称(圆周分线法车螺纹)
N10 T0303;	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08;	快速定位至 G92 循环的起始点 *A*
N40 G92 X23.2 Z-32.0 F3.0 Q0;	第 1 线螺纹第 1 刀
N50 X22.6;	第 1 线螺纹第 2 刀
N60 X22.2;	第 1 线螺纹第 3 刀
N70 X22.04;	第 1 线螺纹第 4 刀
N80 G92 X23.2 F3.0 Q180000;	第 2 线螺纹第 1 刀
N90 X22.6;	第 2 线螺纹第 2 刀

```
N100 X22.2;                        第 2 线螺纹第 3 刀
N110 X22.04;                       第 2 线螺纹第 4 刀
N120 G00 X100.0 Z100.0 M09;        快速返回起刀点 S,切削液关
N130 T0300;                        取消刀具补偿
N140 M30;                          程序结束,返回程序头
```

程序示例三：用简单固定循环指令 G92、圆周分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示螺纹的参考程序：

```
O0233;                             程序名称(圆周分线法车螺纹)
N10 T0303;                         选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;                  恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08;            快速定位至 G92 循环的起始点 A
N40 G92 X23.2 Z-32.0 F3.0 Q0;      第 1 线螺纹第 1 刀,背吃刀量为 0.8mm
N50 X23.2 Q180000;                 第 2 线螺纹第 1 刀,背吃刀量为 0.8mm
N60 X22.6 Q0;                      第 1 线螺纹第 2 刀,背吃刀量为 0.6mm
N70 X22.6 Q180000;                 第 2 线螺纹第 2 刀,背吃刀量为 0.6mm
N80 X22.2 Q0;                      第 1 线螺纹第 3 刀,背吃刀量为 0.4mm
N90 X22.2 Q180000;                 第 2 线螺纹第 3 刀,背吃刀量为 0.4mm
N100 X22.04 Q0;                    第 1 线螺纹第 4 刀,背吃刀量为 0.16mm
N110 X22.04 Q180000;               第 2 线螺纹第 3 刀,背吃刀量为 0.16mm
N120 G00 X100.0 Z100.0 M09;        快速返回起刀点 S,切削液关
N130 T0300;                        取消刀具补偿
N140 M30;                          程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：以上程序通过改变螺纹切削起始角 Q_实现多线螺纹加工。程序 O0231 为 G32 指令编程，程序显得烦琐、冗长，G92 指令则较好地解决了这个问题。O0232 和 O0233 多线螺纹的切削方式不同，前者为两线分别加工，后者为两线交替加工，其加工质量更好。

3. 改变螺纹切削起始点

改变螺纹切削起始点车削多线螺纹的原理是：通过轴线的剖面上，相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离（即螺距 P）相等，且螺距乘以线数等于导程，即导程被螺距所均分。按照此原理，轴向相差一个螺距即可车出相邻的螺旋槽。改变螺纹起始点车削多线螺纹的方法又称轴向分线法。以下通过程序示例进行学习。

程序示例一：用多线螺纹加工指令 G32、轴向分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示螺纹。

```
O0234;                             程序名称(轴向分线法车螺纹)
N10 T0303;                         选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;                  恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08;            快速定位至第 1 线螺纹切削的起始点 A1
N40 X23.2;
N50 G32 Z-32.0 F3.0;               第 1 线螺纹第 1 刀
N60 G00 X30.0;
N70 Z4.0;
```

```
N80 X22.6;
N90 G32 Z-32.0 F3.0;              第1线螺纹第2刀
N100 G00 X30.0;
N110 Z4.0;
N120 X22.2;
N130 G32 Z-32.0 F3.0;             第1线螺纹第3刀
N140 G00 X30.0;
N150 Z4.0;
N160 X22.04;
N170 G32 Z-32.0 F3.0;             第1线螺纹第4刀
N180 G00 X30.0;
N190 Z4.0;
N195 G00 X30.0 Z5.5;              螺纹起始点右移1个螺距至第2线螺纹起始点A2
N200 X23.2;
N210 G32 Z-32.0 F3.0;             第2线螺纹第1刀
N220 G00 X30.0;
N230 Z5.5;
N240 X22.6;
N250 G32 Z-32.0 F3.0;             第2线螺纹第2刀
N260 G00 X30.0;
N270 Z5.5;
N280 X22.2;
N290 G32 Z-32.0 F3.0;             第2线螺纹第3刀
N300 G00 X30.0;
N310 Z5.5;
N320 X22.04;
N330 G32 Z-32.0 F3.0;             第2线螺纹第4刀
N340 G00 X30.0;
N350 Z5.5;
N360 X100.0 Z100.0 M09;           快速返回起刀点S,切削液关
N370 T0300;                       取消刀具补偿
N380 M30;                         程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：本程序为程序 O0231 的改进，增加了一个轴向分线程序段 N195，同时，修改了程序段 N230、N270、N310、N350。

程序示例二：用简单固定循环指令 G92、轴向分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示螺纹。

```
O0235;                            程序名称(轴向分线法车螺纹)
N10 T0303;                        选择3号刀,调用3号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;                 恒转速切削,主轴正转,转速为300r/min
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08;           快速定位至G92循环的第1线螺纹起始点A1
N40 G92 X23.2 Z-32.0 F3.0;        第1线螺纹第1刀
```

N50 X22.6;	第1线螺纹第2刀
N60 X22.2;	第1线螺纹第3刀
N70 X22.04;	第1线螺纹第4刀
N75 G00 X30.0 Z5.5;	螺纹起始点右移1个螺距至第2线螺纹起始点 A_2
N80 G92 X23.2 Z-32.0 F3.0;	第2线螺纹第1刀
N90 X22.6;	第2线螺纹第2刀
N100 X22.2;	第2线螺纹第3刀
N110 X22.04;	第2线螺纹第4刀
N120 G00 X100.0 Z100.0 M09;	快速返回起刀点 S,切削液关
N130 T0300;	取消刀具补偿
N140 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：本程序为程序 O0232 的改进，增加了一个轴向分线程序段 N75，同时，在程序段 N80 增加了 G92 循环指令的切削终点坐标 Z-32.0。G92 与 G00 为同组（01 组）的模态指令。

程序示例三：用简单固定循环指令 G92、轴向分线法、基本编程方式加工图 2-87 所示内螺纹。

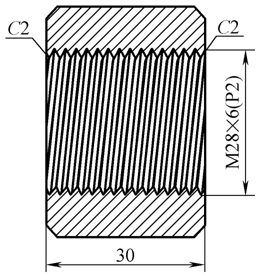


图 2-87　螺纹加工图示(2)

O0236;	程序名称(轴向分线法车内螺纹)
N10 T0303;	调用3号刀及3号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 S800 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为800r/min
N30 G00 X100. Z100.;	快速定位至起刀点
N40 G00 X20. Z8. M08;	快速定位至第1线螺纹循环起始点 A_1,开切削液
N50 G92 X26.5 Z-32. F6.;	G92 指令加工第1线螺纹,第1刀
N60 X27.;	第2刀
N70 X27.5;	第3刀
N80 X28;	第4刀
N90 G00 X20. Z6.;	螺纹起始点左移1个螺距至第2线螺纹起始点 A_2
N100 G92 X26.5 Z-32. F6.;	G92 指令加工第2线螺纹,第1刀
N110 X27.;	第2刀
N120 X27.5;	第3刀
N130 X28;	第4刀
N140 G00 X20. Z4.;	螺纹起始点右移1个螺距至第3线螺纹起始点 A_3
N150 G92 X26.5 Z-32. F6.;	G92 指令加工第3线螺纹,第1刀
N160 X27.;	第2刀
N170 X27.5;	第3刀
N180 X28;	第4刀
N190 G00 X100. Z100. M09;	快速返回起刀点,关切削液
N200 T0300;	取消3号刀具补偿
N210 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：本程序采用径向进刀、恒切削深度控制，优点是每一刀切削深度控制方便，不足之处是程序冗长。

示例程序四：用复合固定循环指令 G76、轴向分线法、基本编程方式加工图 2-86 所示螺纹。

O0237；	程序名称(轴向分线法车螺纹)
N10 T0303；	调用 3 号刀及 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S300 M03；	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X120. Z160. ；	快速定位至起刀点
N40 G00 X35. Z4. M08；	快速定位至第 1 线螺纹循环起始点 A_1,开切削液
N50 G76 P011260 Q100 R80；	G76 指令加工第 1 线螺纹,设置相关参数
N60 G76 X22.05 Z-32.0 R0 P974 Q300 F3. ；	
N70 G00 Z5.5；	螺纹起始点右移 1 个螺距至第 2 线螺纹起始点 A_2
N80 G76 P011260 Q100 R80；	G76 指令加工第 1 线螺纹,设置相关参数
N90 G76 X22.05 Z-32. R0 P974 Q300 F3. ；	
N100 G00 X120. Z160. M09；	
N110 T0300；	
N120 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：G76 指令本身不具有圆周分线法车螺纹，因此，这里采用轴向分线法加工。本例的 G76 指令中（P011260），若刀具角度改为 55°（P011255），则粗车的切入方式为改进式侧向进刀。

2.6.5 调用子程序简化编程

1. G32 指令子程序简化编程技巧与禁忌

通过以上介绍可知，用 G32 指令直接编程，程序繁琐、冗长，G92 指令虽然可以简化编程，但每一刀还是占用一个程序段，对于多线螺纹切削，还有简化的空间，方法之一是调用子程序，参考程序如下：

程序示例一：

O0238；	程序名称(轴向分线法车螺纹)
N10 T0303；	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03；	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30. Z5.5 M08；	快速定位至第 1 线螺纹切削的 Z 轴起点,开切削液
N40 X24. Z5.5；	轴向进刀至螺纹大径
N50 M98 P1032；	调用子程序加工第 1 线螺纹
N60 G00 X24. Z4.	螺纹加工起点左移 1 个螺距
N70 M98 P1032；	调用子程序加工第 2 线螺纹
N80 G00 X100. Z100. M09；	快速返回起刀点,关切削液
N90 T0300；	取消刀具补偿
N100 M30；	程序结束,返回程序头
O1032；	子程序名
N120 G00 U-1.95；	轴向进给一个牙深
N160 G32 Z-32.0 F3. ；	螺纹加工
N170 G00 X30. ；	径向快速退刀
N180 Z5.5；	返回螺纹切削起点
N185 M99；	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析：该程序螺纹仅加工了一刀，使用价值不高，仅适用于较小螺距的螺纹加工，但可供子程序调用原理分析。

程序示例二：程序示例一的改进，用等螺距螺纹加工指令 G32、轴向分线法、子程序调用、恒切削深度控制方式加工图 2-86 所示螺纹。

O0239;	程序名称(轴向分线法,子程序调用车螺纹)
N10 T0303;	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X34. Z5.5 M08;	快速定位至第 1 线螺纹切削的起始点 A_1,开切削液
N50 M98 P71032;	7 次调用子程序 O1032 加工第 1 线螺纹 7 刀
N60 G00 X34. Z4.;	螺纹起点左移 1 个螺距
N70 M98 P72032;	7 次调用子程序 O2032 加工第 2 线螺纹 7 刀
N80 G00 X100. Z100. M09;	快速返回起刀点,关切削液
N90 T0300;	取消刀具补偿
N100 M30;	程序结束,返回程序头
O1032;	子程序名(加工螺纹第一线)
N120 G00 U-10.116;	X 轴快速进刀,恒切削深度 a_p =0.116mm
N160 G32 Z-32.0 F3.;	G32 指令切削螺纹
N170 G00 U10.;	快速退刀
N175 Z5.5;	X 轴快速返回
N185 M99;	子程序结束
O2032;	子程序名(加工螺纹第二线)
N120 G00 U-10.116;	X 轴快速进刀,恒切削深度 a_p =0.116mm
N160 G32 Z-32.0 F3.;	G32 指令切削螺纹
N170 G00 U10.;	快速退刀
N175 Z4.0;	X 轴快速返回
N185 M99;	子程序结束

编程技巧分析：该程序加工的螺纹为 M24×3，螺距 $P=1.5$mm，总背吃刀量（约等于牙型深度）$a_p=(0.61\sim0.62)P=0.62\times1.5\text{mm}=0.93\text{mm}$，按恒切削深度进刀方式控制，假设切削 7 刀，则每刀的切削深度 $a_{pi}=a_p/7=0.93\text{mm}/7\approx0.132\text{mm}$，后面舍去的数值通过刀具补偿合并到了第 1 刀中，实际上第 1 刀允许多切，因此不影响加工。不足之处是最后 1 刀没有减小背吃刀量。

程序示例三：子程序通过径向增量编程，实现多刀逐级进刀加工，不足之处是不能实现恒切削面积控制深度进刀。同时，每一线螺纹均需编写一个子程序，略显繁琐。

O0240;	程序名称(轴向分线法,子程序调用车双线螺纹)
N10 T0303;	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N25 G00 X100. Z100.;	快速定位至起刀点
N30 G00 X34. Z5.5 M08;	快速定位至第 1 线螺纹切削的起始点 A,开切削液
N40 M98 P71032;	7 次调用子程序 O1032 加工螺纹 7 刀

```
N50 G00 X100. Z100. M09;          快速返回起刀点,关切削液
N60 T0300;                        取消刀具补偿
N70 M30;                          程序结束,返回程序头

O1032;                            子程序名(1、2 线螺纹同步加工)
N10 G00 U-10.132;                 X 轴快速进刀,恒切削深度 ap=0.132mm
N20 G32 Z-32.0 F3.;               G32 指令切削第 1 线螺纹
N30 G00 U10.132;                  快速退刀
N40 G00 Z4.0;                     快速定位至第 2 线螺纹的起点
N50 G00 U-10.132;                 X 轴快速进刀,恒切削深度 ap=0.132mm
N60 G32 Z-32.0 F3.;               G32 指令切削第 1 线螺纹
N70 G00 U10.0;                    快速退刀
N80 Z5.5;                         快速定位至第 2 线螺纹的起点
N90 M99;                          子程序结束
```

编程技巧分析：该程序为另外一种编程方案。G32 指令子程序调用不宜每刀背吃刀量不等，因此，采用恒切削深度控制切削深度进刀模式。不足之处是螺纹线数太多时，子程序略长。该程序可以方便地改造为单线螺纹加工程序。编程技巧是 X 方向采用增量坐标 U_编程，实现多次循环的切削深度的递进。程序示例如下：

```
O0241;                            程序名称(改造为单线螺纹的加工程序)
N10 T0303;                        选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;                 恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N25 G00 X100. Z100.;              快速定位至起刀点
N30 G00 X34. Z5. M08;             快速定位至螺纹切削起始点,开切削液
N40 M98 P71032;                   7 次调用子程序 O1032 加工螺纹 7 刀
N50 G00 X100. Z100. M09;          快速返回起刀点,关切削液
N60 T0300;                        取消刀具补偿
N70 M30;                          程序结束,返回程序头

O1032;                            子程序名
N10 G00 U-10.132;                 X 轴快速进刀,恒切削深度 ap=0.132mm
N20 G32 Z-32.0 F3.;               G32 指令切削螺纹
N30 G00 U10.;                     快速退刀
N40 Z5.;                          快速定位至螺纹切削起点
N50 M99;                          子程序结束
```

编程技巧分析：该程序的编程技巧是 X 方向采用增量坐标编程，实现多次循环的切削深度的递进。

程序示例三：将前述程序 O0228 修改为子程序调用、恒切深控制、径向进刀车螺纹的加工程序。

```
O0228;                            程序名称(O0228 改造为子程序调用的加工程序)
N10 G50 X100. Z100.;              G50 指令设定工件坐标系
N20 S300 M03 T0101;               主轴正转,转速为300r/min,调用3 号刀及3 号刀具补偿
```

N30 G00 X58. Z5. ;	快速定位至螺纹切削起点,开切削液
N40 M98 P101228	10 次调用子程序 O1228 加工螺纹 10 刀
N50 G00 X100. ;	X 轴快速返回起刀点,关切削液
N60 Z100. ;	Z 轴快速返回起刀点
N70 T0100;	取消 3 号刀具补偿
N80 M30;	程序结束,返回程序头
O1228;	子程序名
N10 G00 U-10. 248;	X 轴快速进刀,恒切削深度 $a_p = 0.132$mm
N20 G32 Z-57. 0 F2. ;	G32 指令切削螺纹
N30 G00 U10. ;	快速退刀
N40 Z5. ;	快速定位至螺纹切削起点
N50 M99;	子程序结束

编程技巧分析：该程序加工的螺纹为 M48 ×2，螺距 $P = 2$mm，总背吃刀量（约等于牙型深度）$a_p = (0.61 \sim 0.62)P = 0.62 \times 2\text{mm} = 1.24\text{mm}$，按恒切削深度进刀方式控制，假设切削 10 刀，则每刀的切削深度 $a_{pi} = a_p/7 = 1.24\text{mm}/10 = 0.124\text{mm}$，直径值为 0.248mm。

总结：子程序通过径向增量编程（这是编程技巧），实现多刀逐级进刀，实现多刀加工，不足之处是不能实现恒切削面积控制深度进刀。

子程序调用实现螺纹的多刀加工可简化编程，下面再来看一下 G92 指令子程序调用编程。

2. G92 指令子程序调用简化编程技巧与禁忌

程序示例：将前述程序 O0235 改造为子程序调用格式。

O0235;	程序名称(轴向分线法,子程序调用车螺纹)
N10 T0303;	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03;	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30. 0 Z4. 0 M08;	快速定位至第 1 线螺纹起始点 A_1
N40 M98 P1225;	调用子程序加工第 1 线螺纹
N50 G00 X30. 0 Z5. 5;	螺纹起始点右移 1 个螺距至第 2 线螺纹起始点 A_2
N80 M98 P1223;	调用子程序加工第 1 线螺纹
N120 G00 X100. 0 Z100. 0 M09;	快速返回起刀点 S,切削液关
N130 T0300;	取消刀具补偿
N140 M30;	程序结束,返回程序头
O1225;	子程序名
N10 G92 X23. 2 Z-32. 0 F3. 0;	G92 指令车削螺纹第 1 刀
N20 X22. 6;	车削螺纹第 2 刀
N30 X22. 2;	车削螺纹第 3 刀
N40 X22. 04;	车削螺纹第 4 刀
N50 M99;	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析：本程序为程序 O0235 的改进，在轴向分线法的基础上，增加了子程序调用功能。

优点：可实现恒切削面积控制切削深度径向进刀。子程序调用简化了编程，但对于线数较多的多线螺纹，主程序的写法仍然略显繁琐与重复。进一步改进程序如下：

O0235；	程序名称(轴向分线法,子程序调用车螺纹)
N10 T0303；	选择 3 号刀,调用 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S400 M03；	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X30.0 Z4.0 M08；	快速定位至第 1 线螺纹起始点 A_1
N40 M98 P21225；	调用子程序 2 次分别加工第 1、2 线螺纹
N90 G00 X100.0 Z100.0 M09；	快速返回起刀点 S,切削液关
N100 T0300；	取消刀具补偿
N110 M30；	程序结束,返回程序头
O1225；	子程序名
N10 G92 X23.2 Z-32.0 F3.0；	G92 指令车削螺纹第 1 刀
N20 X22.6；	车削螺纹第 2 刀
N30 X22.2；	车削螺纹第 3 刀
N40 X22.04；	车削螺纹第 4 刀
N45 G00 W1.5；	螺纹起始点右移 1 个螺距至第 2 线螺纹起始点 A_2
N50 M99；	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析：本程序为程序 O0235 的进一步改进，在子程序后面增加了程序段 N45 实现下一线螺纹起始点的定位。

编程技巧提示：这种编程思想特别适用于螺纹线数较多的多线螺纹加工，如要改成 4 线螺纹，螺距仍为 1.5mm，则导程为 6mm，以上程序仅需做如下修改：① 主程序的 N40 程序段改为 4 次调用，即 M98 P41225；② 子程序的 N10 段修改导程，即 N10 G92 X23.2 Z-32.0 F6.0。

3. G76 指令子程序简化编程技巧与禁忌

依照以上原理，对 G76 指令编写的螺纹加工程序 O0237 进行子程序调用的改造，示例程序如下。

示例程序：用复合固定循环指令 G76、轴向分线法、子程序调用编程方式加工图 2-86 所示螺纹。

O0237；	程序名称(轴向分线法,子程序调用车螺纹)
N10 T0303；	调用 3 号刀及 3 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S300 M03；	恒转速切削,主轴正转,转速为 300r/min
N30 G00 X120. Z160.；	快速定位至起刀点
N40 G00 X35. Z4. M08；	快速定位至第 1 线螺纹循环起始点 A_1,开切削液
N50 M98 P21237；	调用子程序 2 次,加工第 1、2 线螺纹
N60 G00 X120. Z160. M09；	快速返回起刀点,关切削液
N70 T0300；	取消 3 号刀具补偿
N80 M30；	程序结束,返回程序头
O1237；	子程序名(G76 指令加工螺纹子程序)
N10 G76 P011260 Q100 R80；	设置 G76 指令相关参数
N20 G76 X22.05 Z-32. R0 P974 Q300 F3.；	

N30 G00 W1.5;　　增量右移 1 个螺距至下一线螺纹的起始点 A_2

N40 M99;　　子程序结束,返回主程序

编程技巧分析：G76 指令本身就是一个集成度很高的专用螺纹加工指令，因此，当螺纹线数不多时，其子程序调用意义不大，除非螺纹线数较多的场合。以上程序为加工双线螺纹的程序。若将 N50 程序段子程序调用次数改写 P41237，子程序 N20 程序段的导程改为 F6.，其他部分基本不动即可完成 4 线螺纹加工编程。

2.7　梯形螺纹的车削技巧

2.7.1　梯形螺纹基本要素分析

国内的梯形螺纹主要为米制螺纹，相关标准号为 GB/T 5796.1～4—2005，牙型角为 30°，其牙型如图 2-88 所示，基本要素的计算式见表 2-6。

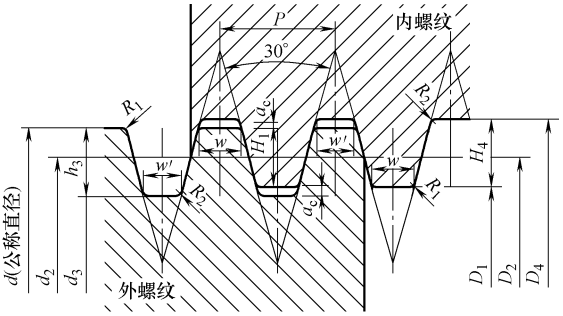


图 2-88　梯形螺纹牙型图

表 2-6　梯形螺纹基本要素及计算式

名　称	计算公式				
牙型角 α	$\alpha=\alpha'=30°$				
螺距 P/mm	1.5～44，具体值参见螺纹标准 GB/T 5796.1				
牙顶间隙 a_c/mm	螺距 P	1.5	2～5	6～12	14～44
	间隙 a_c	0.15	0.25	0.5	1.0
外（内）螺纹大径 d（D_4）	外螺纹大径 d 为公称直径，$D_4=d+2a_c$				
外（内）螺纹中径 d_2（D_2）	d_2（D_2）$=d-H_1=d-0.5P$				
外（内）螺纹小径 d_3（D_1）	$d_3=d-2h_3=d-P-2a_c$，$D_1=d-2H_1=d-P$				
基本牙型高度 H_1	$H_1=0.5P$				
牙型高度 h_3（H_4）	h_3（H_4）$=H_1+a_c=0.5P+a_c$				
R_1 和 R_2	$R_{1max}=0.5a_c$，$R_{2max}=a_c$				
外（内）螺纹牙顶宽 w（W）	$w=W=0.366P$				
外（内）螺纹牙底宽 w'（W'）	$w'=W'=0.366P-0.536a_c$				
螺旋角 ϕ	$\tan\phi=P_h/\pi d_2=Pn/\pi d_2$				
螺纹标记示例	(螺纹代号)Tr(公称直径)d×(导程)P_h((螺距)P)(左旋螺纹加代号 LH)				
	例：Tr40×14（P7）				

2.7.2 梯形螺纹结构与车削特点分析

梯形螺纹不同于普通螺纹，其螺距大、切入深，粗车时容易扎刀。同时，切削力和切削热大、刀具散热条件差，限制了切削速度的提高。若仅仅依靠常规的编程指令 G32 和 G92，按照一般的径向进刀方式进刀，其结果是三个切削刃同时切削，对于梯形螺纹的加工非常困难。虽然 G76 指令为侧向进刀，主要为两刃切削，但对于螺距加大的梯形螺纹，其切入到一定深度，同时参与切削刃的长度仍然偏大，因此，对于梯形螺纹而言，G76 一般只用于螺距小于 3 ~4mm 的单线螺纹加工。对于多线螺纹，特别是螺距稍大的梯形螺纹，一般均需在数控系统提供的螺纹加工指令基础上，通过编程实现类似于普通车床上车梯形螺纹的左、右赶刀，或分层加工等方式加工。

图 2-89 所示为梯形螺纹常见的粗车切削进刀方式。

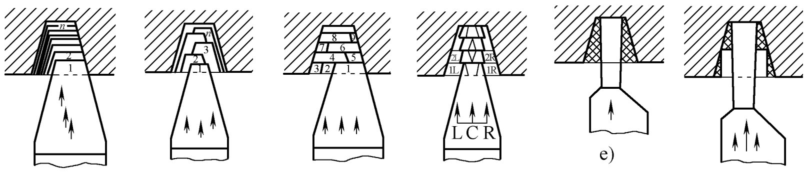


图 2-89 梯形螺纹常见粗车切削进刀方式

a）侧向进刀切削法 b）左右交替切削法 c）分层切削法 d）左右分层切削法 e）车直槽法 f）车阶梯槽法

侧向进刀切削法（图 2-89a）适合于 G76 指令直接编程，可同时完成粗精车加工，适合导程（螺距）小于 4mm 螺纹的加工。

对于导程（螺距）大于 4mm 的螺纹加工，一般需采用图 2-89b ~ d 所示的切削方法，其实际切削刃除第一刀外，后续各刀基本为两刃切削。图 2-89b 所示为左右交替切削法，各刀左右交替逐渐切入进刀切削。图 2-89c 所示为分层切削法，将径向切入深度分层，每一层又分多刀切削，适合于导程较大的螺纹加工。图 2-89d 所示为左右分层切削法，同样将径向切入深度分层，但每一层仅中、左、右三刀切削完成。这几种切削方法一般需借助刀具左右移动指令（G00 或 G01），配合现有螺纹加工指令完成编程。

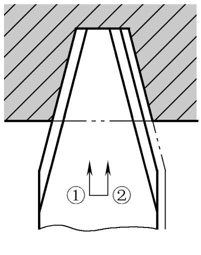


图 2-90 梯形螺纹精车进刀切削方式

对于螺距较大的螺纹，也可用切槽刀具车槽（直槽或阶梯槽）粗车，如图 2-89e、f 所示，然后按图 2-90 所示方式精车。这种方法适用于导程（螺距）较大螺纹的粗加工。

2.7.3 梯形螺纹分层切削法编程

1. 加工原理

分层切削法的加工原理如图 2-89c、d 所示，加工过程中，除每一层的第一刀是三刃切削外，其余各刀均避免了三刃切削。也就是说，每一层第一刀的切削力是最大的，而且每一层的切削深度是相同的，那么，只要第一层的第一刀不扎刀，后面的加工基本就不再扎刀

了。由此可见，此方法能最大限度地避免三刃切削，减小刀具的切削面积，从而减小切削力。在加工时只需根据机床、工件和刀具的刚性，合理选择切削参数，就可以完全避免扎刀现象的发生了。

2. 需解决的问题

每一层切削完进入下一层切削时，第一刀切入点必须沿轴向偏移一段距离，最后一刀也沿轴向偏移一段距离，这两段偏移距离的方向相反。偏移距离 Z 等于背吃刀量 a_p 与牙型半角 $\alpha/2$ 正切函数的乘积，即 $Z = a_p\tan(\alpha/2)$。

分层切削法用系统自带的螺纹加工指令 G32、G92 和 G76 指令无法直接编程，若用普通程序编程，由于其只能用常量数值，不可使用计算式且只能顺序执行，所编制的程序会繁琐、复杂、易出错，故常常采用宏程序编程。

3. 编程示例

图 2-91 所示为一个 Tr36×6 的梯形螺纹，拟用分层切削法编程加工，取刀头刃磨宽度为 1.2mm，每层的背吃刀量 a_p 取 0.5mm，编程之前的基本计算如下：

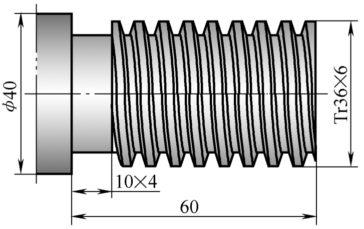


图 2-91　分层切削法示例图

每一层的偏移量：$Z = a_p\tan(\alpha/2) = 0.5\text{mm} \times \tan15° = 0.134\ \text{mm}$

牙底宽：$w' = 0.366P - 0.536a_c = 0.366 \times 6\text{mm} - 0.536 \times 0.5\text{mm} = 1.982\ \text{mm}$（由表 2-6 可知 $a_c = 0.5\text{mm}$）

牙型高：$h_3 = 0.5P + a_c = 0.5 \times 6\text{mm} + 0.5\text{mm} = 3.5\ \text{mm}$

牙槽顶宽：$V = P - w = P - 0.366P = P(1 - 0.366) = 3.804\ \text{mm}$

参考程序如下：

```
O0242;                          程序名称(分层切削法车梯形螺纹宏程序)
M03 S300 T0101;                 主轴正转,转速为300r/min,调用1号刀及1号刀具补偿
M08;                            开启切削液
G00 X50 Z20;                    指定加工起始点
#1 = 36;                        螺纹公称尺寸 φ36mm
#2 = 1;                         第一层进刀尺寸 1mm
#3 = 1.2;                       刀头宽 1.2mm
#4 = 3.804;                     牙槽宽 3.804mm
N10 #5 = #1-#2;                 每层进刀后直径
#6 = #2/2 * TAN[15];            每层进刀轴向让刀量 0.134mm
#7 = #4-3-#6;                   牙槽每层需加宽的尺寸
G00 X40 Z[10 + #6 + 0.1];       每层左侧第一刀起点并留轴向余量 0.1mm
G92 X#5 Z-56 F6;                车削牙槽左侧第一刀
N20 #6 = #6 + 0.8;              每刀轴向加宽 0.8mm
IF [#6 GE #7] THEN #6 = #7;     加宽量≥牙槽宽时,取加宽量 = 牙槽宽
G00 X40 Z[I0 + #6-0.1];         从左至右加宽至终点并留轴向余量 0.1mm
G92 X#5 Z-56 F6;                车削牙槽右侧
IF [#6 LT #7 ]GOTO 20;          加宽量 < 牙槽宽时,转移至 N20 语句循环
#2 = #2 + 1;                    每层进刀 1mm
IF [#2 LE 7] GOTO 10;           总进刀量≤7mm 时,转移至 N10 语句循环
```

```
G00 X40 Z[10 +3.5 * TAN[15] +0.05];    半精车牙槽左侧留 0.05mm 余量
G92 X#5 Z-56 F6;
G00 X40 Z[10 +3.5 * TAN[15]];          精车牙槽左侧
G92 X#5 Z-56 F6;
G00 X40 Z[10 + #7-0.05];               半精车牙槽右侧留 0.05mm 余量
G92 X#5 Z-56 F6;
G00 X40 Z[10 + #7];                    精车牙槽右侧
G92 X#5 Z-56 F6;
G00 X100 Z100 M9;                      退刀,切削液关
M05;                                   主轴停
M30;                                   程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：以 G92 指令为螺纹编程基础，以分层切削法为编程原理，利用宏程序中的条件转移语句等为编程手段，所编程序简短、清晰，有较好的应用价值。

2.7.4 梯形螺纹左右切削法编程

1. 左右分层切削法

（1）加工原理　仍以图 2-91 所示螺纹为例，但采用纯左、右分层切削法，每一层仅左、右各切削一刀（与图 2-89d 所示的左、中、右分层切削法类似）。

（2）编程示例　假设刀头宽度为 1.5mm，则左、右切削时的横向偏移量为 0.482mm（牙底宽与刀头宽度差），其参考程序如下：

```
O0243;                        程序名称(左右分层切削法车梯形螺纹宏程序)
T0101 G00 X100. Z100.;        调用 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系,快速定位至起刀点
M03 S400;                     主轴正转,转速为 400r/min
G00 X37. Z7.;                 快速定位至循环起点
M08;                          开切削液
#1 =36;                       螺纹公称直径
WHILE [#1 GT 29] DO1;         循环 1 设定,若加工直径大于 29mm,循环 1 继续
G00 Z7.;                      左侧螺纹切削定位起点
G92 [#1] Z-56. F6;            左侧车削一刀
G00 Z7.428;                   右侧螺纹切削定位起点
G92 [#1] Z-56. F6;            右侧车削一刀
#1 =#1 -0.4                   每刀车削径向切入量(直径值)
END1                          循环 1 结束
G00 Z7.;                      快速定位至左侧精车循环起点
G92 X29. Z-56. F6;            左侧精车一刀
G00 Z7.428;                   快速定位至右侧精车循环起点
G92 X29. Z-56. F6;            右侧精车一刀
G00 X100. Z100.;              快速退刀至起刀点
M05;                          主轴停止
M09;                          主轴暂停
M30;                          程序结束返回程序头
```

编程技巧分析：

1）本程序以宏程序的循环语句等为编程手段，并加入了精车程序段。

2）程序中每刀径向切入量为0.4mm，折合到侧面单面的切入量约为0.052mm，基本适中。

2. 左中右分层切削法

（1）加工原理　左中右分层加工原理如图 2-89d 所示，加工时，第一刀从中间进刀，然后分别左、右各赶刀切一刀，完成一层的加工，如此循环，直至最终深度。该方法每一层的第一刀均为三刃切削，左、右切削为两刃切削，其中第一刀的切削切削面积最大，因此，只要第一层切削正常，后续切削基本没有问题。

（2）需解决的技术　由于存在多次切削与左、右赶刀切削，如何分配各刀的背吃刀量，以及左、右赶刀移动距离的分配与计算等需认真考虑。

另外，若每一刀都编程加工，程序可能显得冗长，如何简化编程也是需要思考的问题。这里介绍的例子拟采用 G92 指令、子程序调用的方式编程。

3. 编程示例

图 2-92 所示为一个 Tr25 ×6 的梯形螺纹，拟采用左右分层切削法编程加工，螺纹相关参数计算如下：

牙底宽：$w' = 0.366P - 0.536a_c = 0.366 \times 6\text{mm} - 0.536 \times 0.5\text{mm} = 1.982\ \text{mm}$（由表2-6 可知 $a_c = 0.5\text{mm}$）

牙型高：$h_3 = 0.5P + a_c = 0.5 \times 6\text{mm} + 0.5\text{mm} = 3.5\ \text{mm}$

牙顶宽：$w = 0.366P = 0.366 \times 6\text{mm} = 2.196\ \text{mm}$

螺纹小径：$d_3 = d - 2h_3 = 25\text{mm} - 2 \times 3.5\text{mm} = 18\ \text{mm}$

左右赶刀切削方案的确定：假设刀头宽度取 1.6mm，赶刀方案分配如图 2-93 所示，图中双点画线着色部分为刀头示意图，分 3 个赶刀距离计算，第 1 个按背吃刀量 2mm 计算，理论赶刀量为 0.593mm，若留 0.05mm 给最后一刀赶刀精车，则实际赶刀量取 0.543mm；第 2 个赶刀量按背吃刀量 1mm 计算，理论赶刀量为 0.325mm，同样留 0.05mm 给最后一刀赶刀精车，则实际赶刀量取 0.275mm；第 3 个赶刀量按背吃刀量 0.5mm 计算，赶刀量按设计值计算，为 0.191mm［（1.982 − 1.6）/2］。

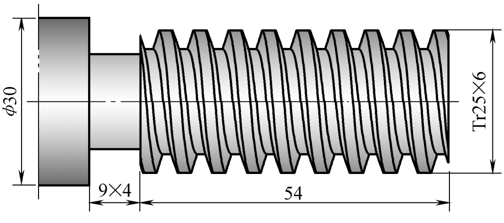


图 2-92　左中右分层切削法示例图

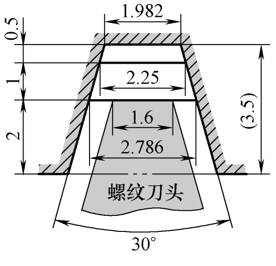


图 2-93　赶刀参数计算简图

参考程序如下：

O0244；	程序名
N10 T0303 G00 X100.0 Z100.0；	调用 3 号刀及 3 号刀具补偿，快速定位至起刀点
N20 M03 S100；	主轴正转，转速为 100r/min
N30 G00 X30.0 Z10.0；	快速定位至螺纹中间循环起始点
N40 M98 P1001；	调用子程序车削螺纹中间第一层深度

```
N50 G00 X30.0 Z10.543;          右赶刀定位
N60 M98 P1001;                  调用子程序车削螺纹右侧第一层深度
N70 G00 X30.0 Z9.457;           左赶刀定位
N80 M98 P1001;                  调用子程序车削螺纹左侧第一层深度
N90 G00 X30.0 Z10.0;            再次定位至螺纹中间循环起始点
N100 M98 Pl002;                 调用子程序车削螺纹中间第二层深度
N110 G00 X30.0 Z10.275;         右赶刀定位
N120 M98 P1002;                 调用子程序车削螺纹右侧第二层深度
N130 G00 X30.0 Z9.725;          左赶刀定位
N140 M98 P1002;                 调用子程序车削螺纹左侧第二层深度
N150 G00 X30.0 Z10.0;           再次定位至螺纹中间循环起始点
N160 M98 P1003;                 调用子程序车削螺纹中间第三层深度
N170 G00 X30.0 Z10.191;         右赶刀定位
N180 M98 P1003;                 调用子程序车削螺纹右侧第三层深度
N190 G00 X30.0 Z9.809;          左赶刀定位
N200 M98 P1003;                 调用子程序车削螺纹左侧第三层深度
N210 G00 X100.0 Z100.0;         快速返回起刀点
N220 M30;                       程序结束,返回程序头

O1001;                          子程序名(切削螺纹小径至φ21mm)
G00 X30.0;
#1 =24.8;
N10 G92 X[#1] Z-56.0 F6.0;
#1 =#1 -0.1;
IF [#1GT21] GOTO 10;
G00 X30.0 Z10.0;
M99;

01002;                          子程序名(切削螺纹小径至φ19mm)
#1 =20.8;
G92 X[#1] Z-56.0 F6.0;
#1 =#1 -0.1;
IF[#1GTI9] GOTO 10;
G00 X30.0 Z10.0;
M99;

01003;                          子程序名(切削螺纹小径至φ18mm)
#l =18.9;
NIO G92 X[#1]Z-56.0 F6.0;
#1 =#l -0.05;
IF [#1GT18] GOTO 10;
G0O X30.0 Z10.0;
M99;
```

编程技巧分析：

1）程序采用子程序调用结构，简化了编程。

2）子程序采用宏程序编程，可方便控制每一层的切入量，且简化编程。

3）实际中还可见左、右赶刀量均按第 3 个赶刀量编程的程序，该方式编程计算简单，但后续每一层切削时牙侧均要切削，刀具磨损严重。

4）本程序将螺纹精车集成在第 3 个赶刀车削中完成，若希望换一把刀具加工时，可另外用一个精车程序。

2.8　变螺距螺纹车削编程

在 FANUC 0i TC 数控车削系统还提供了一个变螺距螺纹加工指令 G34，它在等螺距螺纹加工指令 G32 的基础上，增加一个螺距变化值，即可车削出螺距均匀变化的螺纹，其指令格式为：

G34X(U)_ Z(W)_ F_ K_;

其中，X(U)_ Z(W)_为螺纹切削终点的绝对（增量）坐标；F_为螺纹起点的第一个螺距；K_为每转螺距的变化量（增量或减量）。

例：指令 G34 X20. Z-50. F3. K0.2 可切削起始螺距为 3mm、螺距增量为 0.2mm/r 的变螺距螺纹。

编程技巧：

1）除参数 K 外，其他地址符与 G32 相同。其使用方法亦同 G32。

2）参数 K 值取值范围为 ±0.0001 ~ ±500.0000mm/r，超过范围将报警。另外，若 K 值递减导致螺纹为负值时也将报警。

3）由于 G34 指令指定的是螺纹起点第一个螺距的螺距值，而螺纹车削一般要有一段引导长度，因此，引导长度要求按螺纹变化规律设定为螺距长度的整数倍。

例如，要车削工件上的第一个螺距为 4mm、螺距变化为 0.2mm/r 的变螺距螺纹，假设引导长度大于 2 个螺距，工件坐标系取在端面中心，则起点坐标为 Z8.，起点的第一个螺距为 3.6mm，螺纹指令为：

G34X20. Z-50. F3.6. K0.2;

4）注意，简化版的 FANUC 0i Mate-TC 车削系统不具有该指令。

2.9　其他编程技巧

2.9.1　刀尖圆弧半径补偿使用技巧

1. 问题的引出

在学习数控编程时，常常遇到刀具运动轨迹的概念，那什么是轨迹呢？几何上说点移动的结果为轨迹，而点是没有大小的。涉及数控车削加工编程的点包括：刀尖、刀尖圆弧 R、刀位点，如图 2-94 所示。

在金属切削理论中，刀尖指的是主、副切削刃的交点，这是一个理论上的虚拟点，受副偏角等的影响较大，位置不固定，因此，实际的刀尖又描述为主、副切削刃连接部分——过渡刃。

刀尖圆弧，实际上就是过渡刃，只不过是较为常见的是圆弧过渡刃。

理论刀尖（又称假想刀尖）是基于数控车削加工的对刀操作引出的一个点，是与刀尖圆弧相切且与坐标轴平行的两垂线的交点，它也是虚拟的点，但其位置基本确定。

刀位点是描述刀具运动轨迹的几何点，理论上可由编程者确定，如理论刀尖或刀尖圆弧的圆心等。刀位点的移动结果即刀具运动轨迹。数控车削加工中常用理论刀尖作为刀位点。

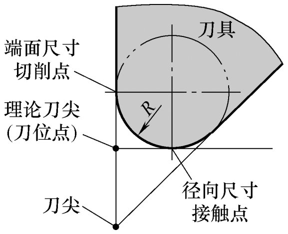


图 2-94 刀尖部分的形状

编程技巧与禁忌：

1）理论刀尖是基于数控车削加工对刀而定义的点，不同的刀头结构形状理论刀尖的位置不同，同一把刀具，根据编程的需要也可以定义不同的理论刀尖（如切断刀）。不同的理论刀尖用刀尖方位号确定，因此，学习数控车削编程的人必须仔细研读理论刀尖方位号图解（见图 2-96）。

2）刀位点非刀尖。初学数控加工编程的人常常把理论刀尖（刀位点）与金属切削理论上的实际刀尖混为一谈，原因是对数控机床操作特别是对刀操作理解不深。

3）金属切削理论上的刀尖，理论上是存在的，但在数控切削实践中不易确定，同时，其受主、负偏角的影响，具有不确定性，数控加工基本不用这个点和概念。

4）刀尖圆弧是确实存在的，可能是刃磨后自然形成的小圆弧，但更多的是人为制造的刀尖圆弧，因为后者更具可控性。

5）数控车削编程对理论刀尖（刀位点）的确切位置必须非常清晰，否则，程序中的尺寸数值可能都是错误的。

2. 刀尖圆弧与加工误差的关系

（1）加工误差分析　理论刀尖是描述刀具运动轨迹的几何点——刀位点，而刀尖圆弧实际存在，其最终确定了加工表面的形状与位置，对加工精度有一定的影响。

以图 2-95 所示的外圆车刀为例。图 2-95a 是加工圆弧面示意图，刀位点在加工圆弧轮廓 *AB* 段时，实际轮廓为 *CD* 段（非圆弧），存在欠切误差（图中剖面线部分）。图 2-95b 是加工斜线轮廓示意图，刀位点在加工斜线 *AB* 段时，实际轮廓为 *CD* 段（圆弧 *R*—直线—圆弧 *R*），也存在欠切误差。图 2-95c 所示为某段轮廓的综合加工示例，其中，加工 *CD*、*EF*、*IJ* 段存在欠切，加工 *GH* 段存在过切，而加工与坐标轴平行的轮廓线 *AB*、*BC*、*DE*、*FG*、*HI* 段不出现欠切或过切。所有这些欠切与过切，最终结果会影响加工精度。

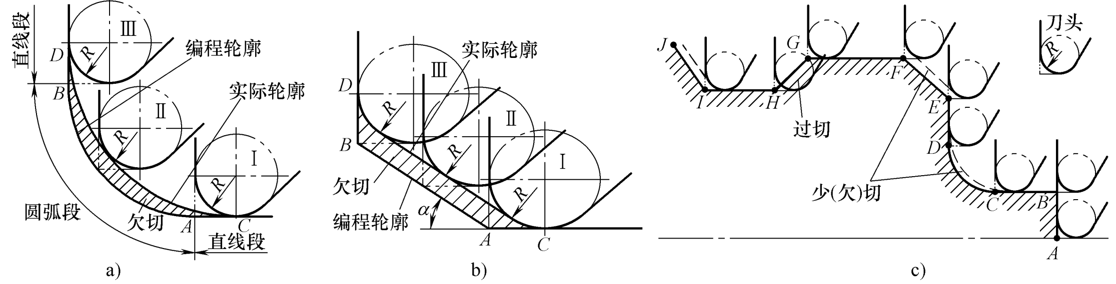


图 2-95 刀尖圆弧与加工误差的关系

a）加工圆弧　b）加工斜线　c）综合示例

针对刀尖圆弧的加工误差，数控系统提出了其应对策略——刀尖圆弧半径补偿。

（2）**编程技巧与禁忌**　明白以上加工误差产生的原因，就不难理解加工过程中的处理技巧，如下所述：

1）由于加工误差仅出现在切削圆弧与斜线轮廓段，因此，对于纯阶梯形工件，可以不考虑刀尖圆弧半径补偿的问题。

2）由于刀尖圆弧造成的加工误差与刀尖圆弧半径有关，当刀尖圆弧半径较小时，其加工误差不可能太大，因此，对于加工精度要求不高的圆弧与斜线轮廓（如工艺倒角与倒圆角等），可以不考虑刀尖圆弧半径补偿的问题。

3）相反，对于有尺寸精度要求的圆弧与斜线轮廓段，特别是刀尖圆弧较大时，不得忽视刀尖圆弧造成加工误差的问题，其对策是程序中引入刀尖圆弧半径补偿功能（指令 G41/G42 与 G40）。

4）不同刀头的刀具，其影响方式不同，理论刀尖方向号绝对不能设置错误，否则，加工误差可能更大。

5）对于不具备刀尖圆弧半径值测量条件的用户，尽可能选用机夹可转位车刀，其刀尖圆弧半径可由其刀具样本或供应商处获得。

6）对于刀位点的位置，即使不使用刀尖圆弧半径补偿功能，也必须十分清晰，因为其对加工编程有很大的影响，如切断刀的刀位点取在左或右，其编程尺寸的 Z 轴坐标是不同的，相差一个刀具宽度。

3. 刀尖圆弧半径补偿编程技巧与禁忌

（1）刀尖圆弧半径补偿参数　图 2-10 所示为数控车削系统偏置（补偿）存储器画面构成，其分为外形与磨损部分，且每一部分又分为四项——位置偏置参数 X、Z 与刀尖圆弧半径补偿参数 R 与 T。

（2）刀尖圆弧半径值 R　FANUC 0i 系统刀具补偿分为两部分管理，因此，刀尖圆弧半径设置也可分为两部分设置，刀尖圆弧半径实际值 R_{OF} 等于外形补偿值 R_{GOF} 与磨损补偿值 R_{WOF} 的代数和，即

$$R_{\mathrm{OF}} = R_{\mathrm{GOF}} + R_{\mathrm{WOF}}$$

式中，外形补偿值 R_{GOF} 为基本补偿值，必须设置；磨损补偿值 R_{WOF} 为微调值，根据需要设置。

（3）理论刀尖方位号 T 值　理论刀尖方位号又称假想刀尖方位号，简称为刀尖方位号，其实质是指定刀位点的位置，所以也可以简称为刀位点号。图 2-96 所示为刀尖方位号图解，分前置与后置刀架两图表示，其实质是相同的，如外圆车刀均为 3 号。图中，A 为理论刀尖，O 为刀尖圆弧中心，各刀头有一个数字即为刀尖方位号 T 值。

（4）**编程技巧与禁忌**　如下所述。

1）使用刀尖圆弧半径补偿功能编程，可以不考虑刀尖圆弧半径而直接用图形编程。

2）不同刀头的刀尖方位号不同，研习时应按刀具安装位置（前置与后置）与加工表面（外圆、内孔、端面、切槽等）等因素联系起来，并与对刀操作联系起来进行理解。

3）刀具半径补偿参数必须在程序执行之前，通过 MDI 面板等输入系统。

4）注意切断刀可以取两种刀尖方位号，输入系统的 T 值要与程序对应。

5）数控车削系统刀尖圆弧半径补偿参数的调用是通过 T 指令实现的。一般情况下系统

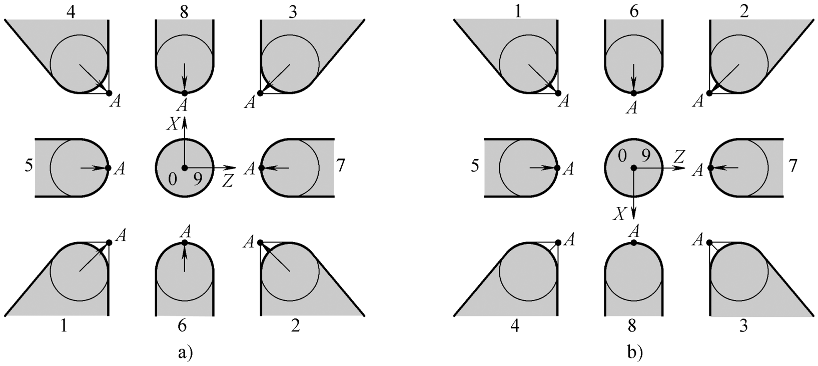


图 2-96　理论刀尖方向号

a）后置刀架　b）前置刀架

设置为外形偏置与磨损偏置用同一个偏置号调用。

6）参数 No. 5002#7（WNP）用于设置刀尖方位号是用外形偏置号还是磨损偏置号指定，默认设置为外形偏置号指定（WNP＝0）。因此，刀尖方位号 T 值尽可能设置在外形偏置存储器中。

7）启动刀尖圆弧半径补偿至取消刀尖圆弧半径补偿之前的补偿执行方式下，刀尖圆弧始终与编程轨迹相切，确保加工无欠切或过切现象。

4. 刀尖圆弧半径补偿指令 G41/G42 与 G40

刀尖圆弧半径补偿功能的启动与取消由指令 G41/G42 与 G40 控制，其中 G41/G42 分别用于指定刀尖圆弧半径左/右补偿，它与编程轨迹的关系如图 2-97 所示。

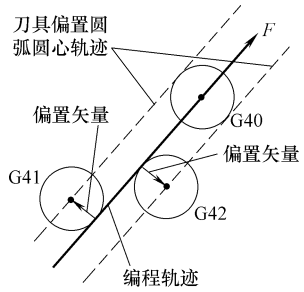


图 2-97　G40 与 G41/G42 的关系

1）数控车床刀尖圆弧半径补偿指令的应用格式为：

T□□△△　　　　　　　　调用□□号刀及△△号刀具补偿

……

G41/G42 G00/G01 X(U)_ Z(W)_ F_；启动刀尖圆弧半径补偿

……

G40 G00/G01 X(U)_ Z(W)_；取消半径补偿

……

M30；　　　　　　　　　程序结束，返回程序头

2）**编程技巧与禁忌**

① 刀尖圆弧半径补偿指令的建立与取消必须在直线程序段中执行，且最好在工件轮廓外完成。

② 与数控铣削系统不同，数控车削系统刀具补偿值是通过刀具指令调用的。

③ 刀尖圆弧半径补偿值必须在程序执行之前存入刀具偏置补偿存储器中。

④ 刀尖圆弧半径补偿指令 G41/G42 与 G40 为同组的模态指令，可以相互注销。

⑤ 刀尖圆弧半径补偿取消指令 G40 与建立指令 G41/G42 一般成对使用，程序尽可能结

束于取消方式，否则程序的结束点可能与起始点不重合，这对 G50 指令建立工件坐标系的程序尤为重要。

⑥ 刀尖圆弧半径补偿期间执行固定循环指令 G90/G94 与 G71 ~ G75 时，圆弧中心与编程轨迹平行（即圆弧与编程轨迹相切），但不进行交点计算。

⑦ 按下 MDI 面板上的 RESET 键，或执行了 M30 或 M02 指令后，系统立即进入刀具半径补偿取消方式。

5. 编程示例

图 2-98 为某刀尖圆弧半径补偿示例图，图 2-99 为其工艺图。由于存在锥面以及较大的圆弧面，因此，需要启用刀尖圆弧半径补偿，其精加工程序如下：

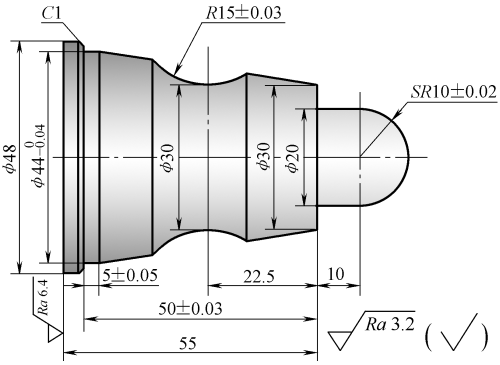


图 2-98　刀尖圆弧半径补偿示例图

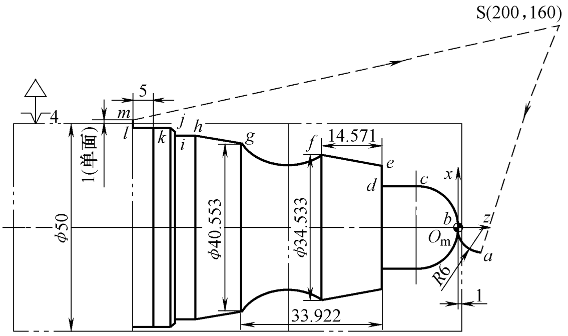


图 2-99　刀尖圆弧半径补偿工艺图

```
O0245;                                  程序名称
N10 G00 T0101;                          调用 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
N20 G97 S800 M03;                       恒转速切削,主轴正转,转速为 800r/min
N30 G54 G00 X200. Z160. M08;            选择 G54 工件坐标系,快速定位至起刀点 S,开切削液
N40 G42 G00 Z6. X-12. ;                 快速定位至点 a,启动刀尖圆弧半径右补偿
N50 G99 G02 X0. Z0. R6. F.2;            圆弧切入值 b 点
N60 G03 X20. Z-10. R10. ;               切削球头圆弧 R0 至 c 点
N70 G01 Z-20. ;                         切削圆柱至 d 点
N80 X30. ;                              切削端面至 e 点
N90 X34.533 Z-34.571;                   切削锥面至 f 点
N100 G02 X40.553 Z-53.922 R15. ;        切削圆弧 R15 至 g 点
N110 G01 X44. Z-65. ;                   切削锥面至 h 点
N120 Z-70. ;                            切削圆柱面至 i 点
N130 X46. ;                             切削端面至 j 点
N140 X48. Z-71. ;                       切削倒角至 k 点
N150 Z-80. ;                            切削圆柱至 l 点
N160 X52. M09;                          径向切出至 m 点,关切削液
N170 G40 G00 X200. Z160. ;              快速返回 S 点,取消刀尖圆弧半径补偿
N180 T0100;                             取消 1 号刀具补偿
N190 M30;                               程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：程序中使用了刀尖圆弧半径补偿，可较好地保证锥面与圆弧面的加工精度。未考虑粗车程序。

下面再来看一个程序，图 2-16 所示零件及工艺图，现用 G71 + G70 指令粗、精车轮廓，并要求具有刀尖圆弧半径补偿功能，各基点描述参考图 2-22。参考程序如下：

O0246；	程序名
N10 T0101；	调用 1 号刀及 3 号刀具补偿，建立工件坐标系
N20 S600 M03；	主轴正转，转速为 600r/min
N30 G00 X160. Z200. M08；	刀具快速定位至起刀点 S，开切削液
N40 X32. Z2.；	快速移动至固定循环起点
N50 G71 U2. R1.；	指定 G71 粗车循环参数
N60 G71 P70 Q150 U0.5 W0.25 F0.3；	
N70 G42 G00 X-2. F0.15 S800；	快速定位至 a 点，启动刀尖圆弧半径右补偿等
N80 G02 X0 Z0 R2.；	圆弧切线切入至 b 点
N90 G03 X10. Z-5. R5.；	切削 $R5$ 球头至 c 点
N100 G01 Z-10.；	切削 $\phi10$ 圆柱至 d 点
N110 G02 X20. Z-15. R5.；	切削 $R5$ 过渡圆角至 e 点
N120 G01 X24.；	切削端面至 f 点
N130 X26. Z-20.；	切削锥面至 g 点
N140 Z-30.；	切削 $\phi26$ 圆柱至 h 点
N150 X32.；	径向切出至 i 点
N160 G70 P70 Q150；	G70 指令精车轮廓
N170 G40 G00 X160. Z200. M09；	快速返回至起刀点 S，取消刀尖半径补偿，关切削液
N180 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N190 M30；	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：程序用 G71 + G70 的方式完成了粗、精车加工，简化了编程，同时引入刀尖圆弧半径补偿，提高了轮廓的加工精度。

2.9.2 多刀加工问题与编程技巧

1. 问题的提出与对策

（1）问题的提出 数控车削加工中，不可能用一把刀具完成整个零件的加工，多刀加工无法避免。

首先，多刀安装存在不确定性，每一把刀具转至工作位置时，其刀位点不可能重合；其次，刀具磨损或破损后更换的新刀具与原刀具的刀位点也不可能重合。这些问题如果通过更改程序进行处理显然不现实，那如何做到程序不变的情况下，各种安装位置的刀具均能走出同一条加工轨迹，加工出合格零件是本节要讨论的问题。

（2）问题的对策 由上文已知，刀具实际到达的坐标位置是程序中坐标值与相应刀具偏置值代数和综合作用的结果，即刀具外形偏置可以改变或控制刀具实际到达的位置。由此可见，刀具外形偏置可用于解决多刀加工刀具安装位置不确定的问题。

处理多刀加工时刀具的外形偏置可分为绝对偏置与相对偏置两种。

绝对偏置是以参考点位置处的刀具为基准进行刀具偏置。如图 2-100 所示，其中存在三

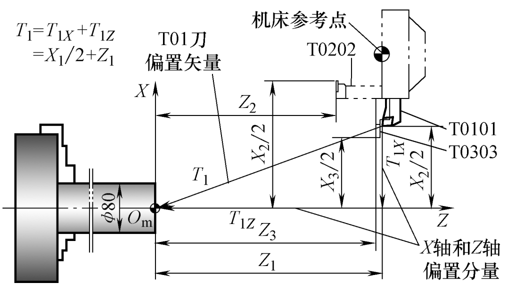


图 2-100　绝对位置偏置应用示意图

把刀，T0101 为当前工作位置刀具，双点画线表示刀架转至工作位置时 T0202 与 T0303 的刀具位置，显然，它们的刀位点是不重合的，但都可以通过各自的外形偏置值将参考点处的刀位点移至工件坐标系 O_w 位置处。以 T0101 刀为例，将偏置值 X_1 和 Z_1（均为负值）分别存入 No. 01 外形偏置存储器的位置偏置 X 和 Z 处，当程序执行了刀具指令 T0101 时，就会调用 No. 01 外形偏置存储器中的偏置值，将刀位点实际位置的坐标原点移至 O_w 处，其可简述为刀具偏置矢量 T_1 将 T01 号刀的刀位点偏移至 O_w 点处，而偏置矢量 T_1 是 X 轴分矢量 T_{1X} 和 Z 轴分矢量 T_{1Z} 的矢量和，而分矢量正是包含正、负号的坐标值 X_1 和 Z_1。同样道理，转至工作位置时 T0202 与 T0303 刀具可以通过自身对应的刀具偏置矢量将刀位点偏移至同样的 O_w 点处。因此，只要程序执行前将各刀具偏置值存入相应刀具偏置存储器中，则执行某刀具指令后就可以将不同位置刀具的刀位点偏移至同一点上，也就是各刀的刀具位置不受刀具安装位置不确定性的影响。绝对坐标偏置是多刀加工 T 指令对刀建立工件坐标系的基础。

相对偏置是以某把刀具处于工作位置时的刀位点为基准点，这把刀具常称为基准刀（或标准刀），其他非基准刀具（或称为非标准刀）转至工作位置时一般与其存在偏差，如图 2-101 所示，T0101 为标准刀，T0202 和 T0303 为非标准刀。对于转至工作位置的非标准刀，若引入其相对于标准刀对应的偏置矢量，即可以将刀位点偏置至与标准刀刀位点重合的位置。以 T02 刀为例，其刀位点相对于标准刀刀位点存在相对坐标 U 和 W，若将其存入 No. 02 外形偏置存储器中，即相当于分矢量 T_{2X} 和 T_{2Z}，其合成矢量为 T_2，当程序执行刀具指令 T0202 时，其结果相当于将刀位点偏移至 T01 号刀的刀位点处，其结果是修正了刀具安装的位置偏差，当然不用修改程序即可加工出合格的零件。相对偏置主要用于 G50 指令和 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系时非标准刀的装刀位置偏差的修正。

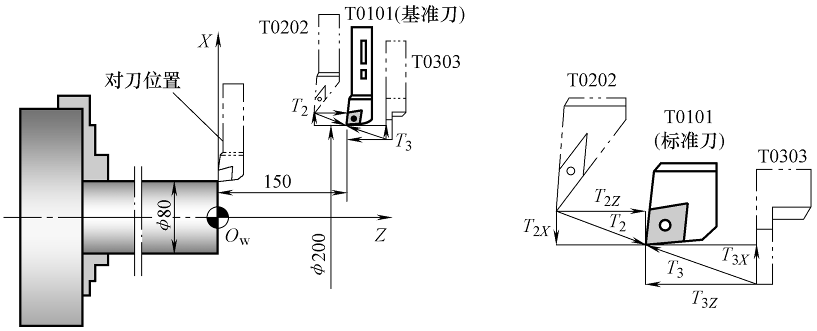


图 2-101　相对位置偏置应用示意图

非标准刀相对偏置的测量与输入方法参见 4. 5. 1 节中相关内容。

2. 多刀加工编程技巧与禁忌

数控车削多刀加工处理方法与工件坐标系建立指令有关，下面就数控车削加工中三种常

见工件坐标系建立方法分别进行讨论。

（1）T指令刀具几何偏置建立工件坐标系的编程技巧与禁忌　如下所述：

应用T指令刀具几何偏置建立工件坐标系的多刀加工程序，所有刀具不分标准刀与非标准刀，每把刀具均需通过对刀，将其绝对偏置值存入相应的刀具偏置存储器中。

应用技巧与禁忌：

1）每把刀均需单独对刀，写入的是各自的绝对坐标偏置。各刀的几何偏置互不干涉。

2）由于各刀的几何偏置互不干涉，因此，若存在对刀误差等，可单独调整各刀的几何偏置值。

3）更换新刀时，仅需对需要更换的刀具进行对刀。

4）由于其为刀具指令调用刀具偏置值，因此，调用偏置与取消偏置必须成对使用，即前面应用了刀具指令T△△××调用偏置建立工件系后，则调用下一把刀具之前必须应用指令T△△00取消偏置（一般单独一个程序段书写），恢复到调用偏置之前的状态。

（2）G50指令设定工件坐标系的编程技巧与禁忌　如下所述：

应用G50指令设定工件坐标系的多刀加工程序中，必须先选择一把刀具作为基准，即标准刀，以该刀对刀应用G50指令建立工件坐标系，其余的刀具自然就成为了非标准刀，需用相对偏置修正其与标准刀的安装误差。

应用技巧与禁忌：

1）标准刀一般选择第一次加工的刀具，其几何偏置必须清零，但程序中必须保留偏置号调用的格式，因为其可能还需用于磨损偏置等。

2）先完成非标准刀相对偏置的写入，然后再以标准刀对刀设定工件坐标系，并执行程序。

3）非标准刀的几何偏置存入的是相对于标准刀的相对偏置，更换新刀后必须重新对刀。

4）若标准刀更换新刀重新对刀，对非标准刀的偏置值有所影响，因此，非标准刀也必须重新对刀。

5）每把刀具使用完成准备更换新刀前，必须取消刀具偏置，取消偏置指令T△△00一般单独一个程序段书写。

（3）G54～G59指令预置工件坐标系编程技巧与禁忌　如下所述：

应用G54～G59指令预置并选择建立工件坐标系的多刀加工程序中，同样也必须选择一把刀具作为标准刀，并以该刀对刀预置工件坐标系，其余的刀具为非标准刀，需用相对偏置修正其与标准刀的安装误差。

应用技巧与禁忌：

1）标准刀一般选择第一次加工的刀具，其几何偏置必须清零，但程序中必须保留偏置号调用的格式，因为其可能还需用于磨损偏置等。

2）非标准刀的几何偏置存入的是相对于标准刀的相对偏置，更换新刀后必须重新对刀。

3）标准刀与非标准刀对刀的先后顺序无要求。

4）标准刀的更换不仅必须重新对刀，且对非标准刀也有所影响，因此非标准刀也必须重新对刀修改相对偏置值。

5）每把刀具使用完成准备更换新刀前，必须取消刀具偏置，取消偏置指令 T△△00 一般单独一个程序段书写。

2.9.3　加工尺寸的控制技巧

1. 问题的提出与处理对策

机械加工的最终目的是保证尺寸精度与表面粗糙度。

表面粗糙度的控制主要是选择合适的切削用量，其中与数控编程有关的控制参数主要是主轴速度。一般来说，恒线速度控制的主轴速度表面质量较为均匀，因此，精车加工时可考虑选用 G96 指令控制表面粗糙度。关于切削用量的具体值，可参见机械制造方面的图书资料，这里不展开讨论。

数控加工刀具运动的轨迹是由程序控制的，在程序正确的情况下，由于刀具磨损、对刀误差等因素也可能造成加工尺寸的超差，这时，通过修改程序控制尺寸显然不现实，实际中，刀具磨损偏置为解决这个问题提供了手段。

上一节多刀加工探讨的是外形偏置控制多刀加工装刀偏差的修正问题，这一节将讨论磨损偏置微调刀具位置控制加工尺寸的问题。

2. 加工尺寸的控制技巧与禁忌

前面多处谈到 FANUC 系统将刀具偏置分为两部分管理，这种设计是非常科学的，如何合理使用值得研习，本节使用刀具磨损偏置微调刀具位置控制加工尺寸便是很好的应用示例。

前面也谈到，刀具的实际偏置值等于外形偏置与磨损偏置的代数和，也就是说，在磨损偏置存储器中存入适当数值，就能控制刀具在原刀具运动轨迹的基础上适当偏移，这就是加工尺寸的控制原理。

刀具指令为 T（2＋2）格式，这种格式并不限于初学者常用的每个刀具号对应一个刀具补偿号，而是说同一个刀具号可以调用不同的刀具补偿号，这就为刀具指令控制尺寸提供了更多的选择。事实上，数控系统给的刀具偏置号远大于刀具号。

刀具偏置控制轨迹变化具有水涨船高的特点，即同一个刀具偏置值可能会使多个尺寸同时变化，因此，各尺寸公差的分布规律应调整至尽可能相同。必要时，可将某一个关键尺寸分离出来编程，并用不同的偏置号调用控制。

针对数控系统的以上特点，总结出数控加工尺寸控制的原则与方法如下：

1）浏览图样，查找关键尺寸及其公差，制订尺寸控制的方法。

2）对关键尺寸进行尺寸换算，通过调整基本尺寸值，将尺寸公差换算成对称分布的形式。若主要尺寸的公差相等或相差不大时，只要尺寸公差向同一个方向分布，可以不用换算尺寸。

3）选择公差最小的尺寸作为监控尺寸，加工时通过调整磨损偏置控制该尺寸。

4）尺寸控制的偏置微调，尽可能使用刀具磨损偏置存储器控制。

以下通过一个程序示例说明尺寸控制的方法。

图 2-102 为加工件示意图，其加工工艺为：粗车左端面→粗车左轮廓→精车左轮廓→掉头→粗车右端面→粗车右轮廓→精车右轮廓→车退刀→车螺纹。图 2-103 为左端加工示意图，工件坐标系取在图 2-103 的右端面，加工余量为 2mm，拟采用粗、精车两把刀，应用复

合固定循环指令 G71 + G70 指令编程。图中直径尺寸有公差要求，且公差不等，为此将其换算为公差带对称分布的尺寸，并以公差最小的尺寸 $\phi35^{\ 0}_{-0.039}$（$\phi34.981 \pm 0.02$）作为监控尺寸。参考加工程序如下：

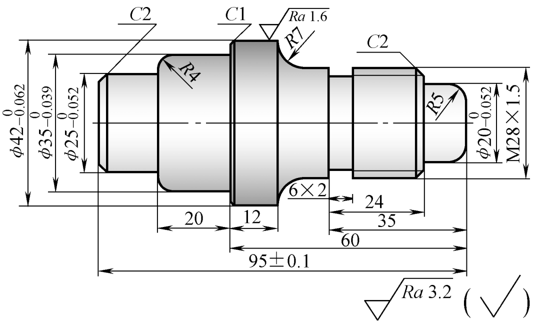


图 2-102　加工尺寸控制工件示意图

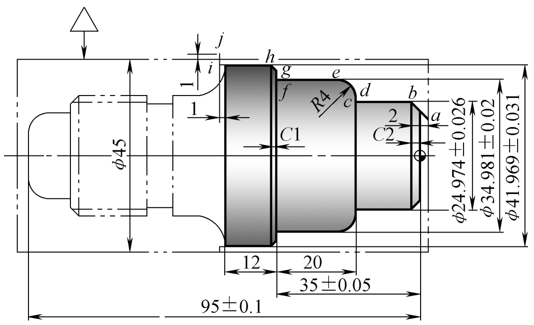


图 2-103　左端加工工艺简图

O0247；	程序名
N10 G00 X100. Z100. T0101；	调用 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系,并快速定位至起刀点
N20 G97 S400 M03；	恒转速控制,主轴正转,转速为 400r/min
N30 X46. Z0 M08；	快速定位至车端面起点,开切削液
N40 G99 G01 X0 F0.2；	转进给控制,车端面
N50 Z2.；	轴向退刀
N60 G00 X48.；	快速定位值固定循环 G71 的起点
N70 G71 U2. R0.5；	定义 G71 指令粗车轮廓,背吃刀量 2mm,退刀量 0.5mm
N80 G71 P90 Q180 U0.5 W0.1；	指定循环起始与结束行号,精加工余量 $\Delta U = 0.5$mm,$\Delta w = 0.1$mm
N90 G00 X16.974 Z2.；	快速定位至 *a* 点
N100 G01 X24.974 Z-2. S800 F0.1；	直线切线切入车倒角至 *b* 点,指定精车主轴速度与进给量
N110 Z-15.；	车圆柱面至 *c* 点
N120 X26.981；	车端面至 *d* 点
N130 G03 X34.981 Z-19. R4.；	车倒圆角 *R*4 至 *e* 点
N140 G01 Z-35.；	车圆柱面至 *f* 点
N150 X39.969；	车端面至 *g* 点
N160 X41.969 Z-36.；	车倒角至 *h* 点
N170 Z-48.；	车外圆至 *i* 点
N180 X47.；	径向退刀至 *j* 点
N190 G00 X100. Z100. M09；	快速退刀至起刀点,关切削液
N200 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N210 T0202；	调用 2 号刀及 2 号刀具补偿,建立工件坐标系
N220 G00 X46. Z2. M08；	快速定位至固定循环起点,开切削液
N230 G70 P90 Q180；	G70 指令精车轮廓
N240 G00 X100. Z100. M09；	快速退刀至起刀点,关切削液
N250 T0200；	取消 2 号刀具补偿
N260 M30；	程序结束,返回程序头

编程技巧与禁忌分析：

1）程序采用刀具几何偏置建立工件坐标系，各刀偏置值相互独立，互不干扰。

2）主要尺寸按尺寸中值编程，尺寸精度控制方便。

3）采用粗、精车两把刀加工，更易保证加工质量。

4）选用公差最小的尺寸作为监控尺寸，通过调整 02 号磨损偏置存储器的偏置值控制尺寸，若该尺寸合格，其余尺寸公差更大的尺寸自然合格。

5）采用 G71 + G70 固定循环指令编程，简化了程序。

2.9.4　切断加工终点坐标的确定技巧与禁忌

切断加工看似简单，但现有资料中关于刀具切断指令刀尖终点的位置常常超过轴线一定距离，其实这是一个误区，仅从几何位置考虑问题，未联系切削原理知识。

图 2-104 所示为切断刀切削方向与切断加工示意图，其与编程有关的几何参数有刀片宽度 W、刀尖圆弧半径 r 和主偏角等。

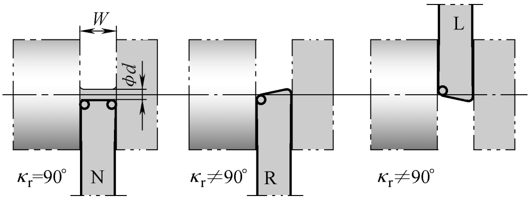


图 2-104　切断刀切削方向与切断加工示意图

数控编程切断加工终点坐标的**确定技巧与禁忌**如下：

1）若仅仅是切断加工，刀尖切断至 ϕ1mm 左右依靠零件的重量等就可以掉落，留下的毛刺部分留给车端面工序处理。这是较好的编程方案。

2）切断刀尖的极限深度是刀尖圆弧与端面的切点进给至工件中心，这实际上较难控制，若刀具进给超过这个深度，原刀尖的压应力变为拉应力，极易出现刀尖崩刃现象，特别是切断刀刚性较差的场合。

3）针对第 2）条，笔者认为切断刀的极限位置限制在刀尖点至轴线位置即可，即以上的切点距轴线距离为刀尖圆弧半径。

4）若工件重量较大或转速较高，工进易脱落，适当增大刀尖距轴线的距离有利于刀具寿命的提高。

5）尽量避免刀尖超过工件轴线的切断方式，若希望中间留下的材料少，采用主偏角不等于 90°的切断刀也是一种不错的选择。

关于切断加工，其他还需**注意的问题**有：

1）刀具安装刀尖中心高度误差不超过 ±0.1mm。

2）刀具中心线与工件轴线必须垂直。

3）若采用恒转速控制，切至中心时可以适当降低进给速度。

4）采用恒线速度控制，切断效果较好，但要注意主轴最大速度的钳制。

5）切断时必须考虑断屑的问题，必要时采用啄式进刀控制断屑。

6）冷却也是切断时不容忽视的问题，充足与准确的冷却必须考虑。

7）在保证刀具强度的前提下，尽可能选择刀宽 W 小的刀具，以提高材料利用率。

8）必要时可扩大外部的槽宽，这种方式不仅浪费材料，且加工效率低，是不得已才采用的方法。

9）切断加工进给量不宜太大，一般控制在 0.1 ~ 0.2mm/r。

2.9.5　计算机辅助编程和手工编程的比较与应用技巧

计算机辅助编程（又称自动编程）是实际生产中常用的编程方法之一，但是，计算机生成的程序格式固定，往往要操作者手工修改以符合自身要求。

1. 计算机辅助编程示例

以下基于 Mastercam X6 编程软件，以图 2-105 所示零件为例进行讨论。工艺过程为：T0101 粗车外轮廓→T0111 精车外轮廓（应用 G96、G42 等）→T0202 切断，自动编程的 NC 程序如下所示。简化前后的刀具轨迹如图 2-106 所示。

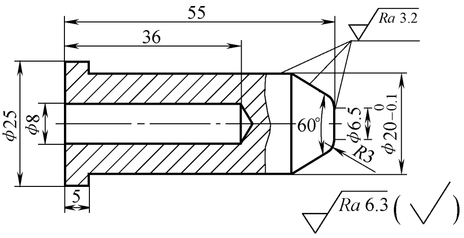


图 2-105　自动编程零件示例

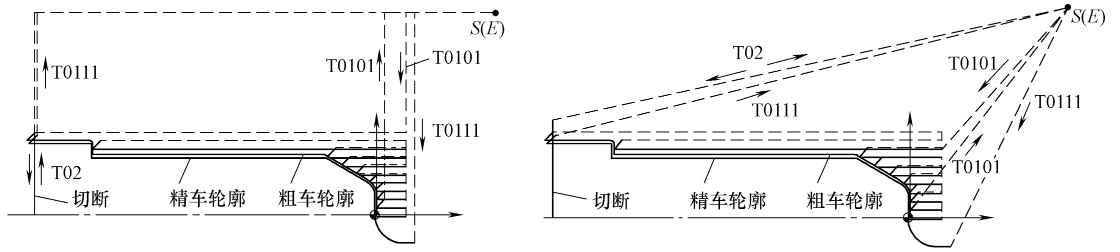


图 2-106　程序简化前、后刀具轨迹

a）简化前　b）简化后

自动生成的程序	分析与处理
%	程序开始符
N10 O0000	1）程序名称中的程序号 O0000 可根据需要改写
(PROGRAM NAME -编程方案)	2）括号内的内容（下同）为自动生成的程序注释，为简化阅读，可以删除
(DATE = DD-MM-YY - 20-08-13 TIME = HH:MM - 14:39)	
(MCX FILE - E：\ 编程案例 . MCX-6)	
(NC FILE - E：\ 编程方案 . NC)	3）N20 和 N40 段中的指令 G21、G18 等（包括后面的 G97 和 G99）是一般数控车床的默认设置，可认为是程序的初始化，为使程序简化可以删除，但留下也不影响程序执行，依各人习惯而定
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)	
N20 G21	
(TOOL - 1 OFFSET - 1)	
(OD ROUGH RIGHT - 80 DEG.　INSERT - CNMG 12 04 08)	
N30 G0 T0101	4）程序中各指令代码数字的前零均省略，不影响程序的使用，一般的数控系统均能识别这种格式
N40 G18	
N50 G97 S550 M03	5）N60 段显示程序采用 G54 预置工件坐标系并调用建立工件坐标系。这可根据自身习惯更改。同时可看出起刀点 S 为（200，100）
N60 G0 G54 X200. Z100.	
N70 Z5.5	
N80 X23.022	
N90 G99 G1 Z3.5 F.5	6）N30 ~ N670 为粗车轮廓程序段。这里使用基本指令编程，程序通用性好，虽然程序段较多，但用 CF 卡输入或 RS232C 通信传输程序，这一段多不用考虑。同时，这部分描述刀具移动的指令，坐标值是否正确可以不用考虑，一般
N100 Z-49.8	
N110 X24.8	
N120 G18 G3 X26. Z-50.4 R.6	

（续）

自动生成的程序	分析与处理
N130 G1 Z-61. 4 N140 X28. 828 Z-59. 986 N150 G0 Z5. 5 N160 X20. 044 N170 G1 Z3. 5 N180 Z-8. 103 N190 X20. 839 Z-8. 791 N200 G3 X21. Z-9. 091 R. 6 N210 G1 Z-49. 8 N220 X23. 422 N230 X26. 251 Z-48. 386 N240 G0 Z5. 5 N250 X17. 067 N260 G1 Z3. 5 N270 Z-5. 524 N280 X20. 444 Z-8. 449 N290 X23. 273 Z-7. 035 N300 G0 Z5. 5 N310 X14. 089 N320 G1 Z3. 5 N330 Z-2. 945 N340 X17. 467 Z-5. 871 N350 X20. 295 Z-4. 456 N360 G0 Z5. 5 N370 X11. 111 N380 G1 Z3. 5 N390 Z-. 722 N400 G3 X12. 535 Z-1. 6 R3. 6 N410 G1 X14. 489 Z-3. 292 N420 X17. 317 Z-1. 878 N430 G0 Z5. 5 N440 X8. 133 N450 G1 Z3. 5 N460 Z. 081 N470 G3 X11. 511 Z-. 916 R3. 6 N480 G1 X14. 34 Z. 498 N490 G0 Z5. 5 N500 X5. 156 N510 G1 Z3. 5 N520 Z. 2 N530 X6. 3 N540 G3 X8. 533 Z. 022 R3. 6 N550 G1 X11. 362 Z1. 437 N560 G0 Z5. 5 N570 X2. 178 N580 G1 Z3. 5 N590 Z. 2 N600 X5. 556	不会错。但其中涉及进给指令 F 必须注意数值是否变化 7）注意到粗车时未见切削液开启指令 M08，这是因为自动编程时未设置，可根据需要在切入材料前（N70 段）加入，当然后面适当位置要有 M09 与其呼应

（续）

自动生成的程序	分析与处理
N610 X8.384 Z1.614	
N620 G0 Z5.5	
N630 X-.8	
N640 G1 Z3.5	
N650 Z.2	
N660 X2.578	
N670 X5.406 Z1.614	
N680 G0 X200.	
N690 Z100.	8）N680 与 N690 段为返回起刀点 *E*（与 *S* 点重合）程序段，分两段返回较为安全，但若确认直接返回无干涉，可以考虑合并为一个程序段
N700 T0111	
N710 G18	
N720 G50 S1500	9）N700 段调用新的偏置值，准备精车
N730 G96 S100	10）由于精车时采用了恒线速度控制，故有 N720 与 N730 段的最大速度钳制指令，这个用法必须保留
N740 G42	
N750 Z7.	
N760 X-10.	11）N740 为启动刀尖圆弧半径补偿，可根据习惯将其与某一段直线段合在一个程序段，同时注意后面与其呼应的 G40 指令段位置（N850）
N770 G1 Z5. F.2	
N780 G18 G2 X0. Z0. R5.	
N790 G1 X6.5	
N800 G3 X11.696 Z-1.5 R3.	
N810 G1 X20. Z-8.691	
N820 Z-50.	
N830 X25.	
N840 Z-61.	
N850 G40 X27.828 Z-59.586	12）N880 段的返回坐标参考点可以删除，只要程序的起始点 *S* 与退出点 *E* 取得足够安全
N860 G0 X200.	
N870 Z100.	
N880 G28 U0. V0. W0. M05	13）N890 段取消 1 号刀具补偿，是与前述的 T0101 呼应。N900 段为程序暂停，可用于测量精车的尺寸并设置刀具偏置值、清理切屑、手工变速等，可根据需要决定是否保存
N890 T0100	
N900 M01	
(TOOL - 2 OFFSET - 2)	
(OD GROOVE CENTER - MEDIUM INSERT - N151.2-400-40-5G)	14）N910 预示这切断程序的开始。切断加工自动加入了切削液控制指令 M8 和 M9
N910 G0 T0202	
N920 G18	
N930 G97 S300 M03	
N940 G0 G54 X200. Z100. M8	
N950 Z-60.	
N960 X33.	
N970 G1 X29. F.1	
N980 X.4	15）N980 段显示切断时刀尖未过中心
N990 X4.4	
N1000 G0 X29.	
N1010 X200.	
N1020 Z100.	
N1030 M9	
N1040 G28 U0. V0. W0. M05	
N1050 T0200	

（续）

自动生成的程序	分析与处理
N1060 M30	16）N1060 为程序段结束，返回程序头
%	程序结束符

下面为以上程序手工修改后的程序，读者可对照阅读，体会为什么要这样修改，也许你有自己的观点。为对照阅读方便，未将程序段序号重新编号。

```
%
O2105
N30 T0101
N50 G97 G0 X200. Z100. S550 M03
N70 Z5.5 X23.022 M08
N90 G99 G1 Z3.5 F.5
N100 Z-49.8
N110 X24.8
N120 G18 G3 X26. Z-50.4 R.6
N130 G1 Z-61.4
N140 X28.828 Z-59.986
N150 G0 Z5.5
N160 X20.044
N170 G1 Z3.5
N180 Z-8.103
N190 X20.839 Z-8.791
N200 G3 X21. Z-9.091 R.6
N210 G1 Z-49.8
N220 X23.422
N230 X26.251 Z-48.386
N240 G0 Z5.5
N250 X17.067
N260 G1 Z3.5
N270 Z-5.524
N280 X20.444 Z-8.449
N290 X23.273 Z-7.035
N300 G0 Z5.5
N310 X14.089
N320 G1 Z3.5
N330 Z-2.945
N340 X17.467 Z-5.871
N350 X20.295 Z-4.456
N360 G0 Z5.5
N370 X11.111
N380 G1 Z3.5
N390 Z-.722
N400 G3 X12.535 Z-1.6 R3.6
N410 G1 X14.489 Z-3.292
N420 X17.317 Z-1.878
N430 G0 Z5.5
N440 X8.133
N450 G1 Z3.5
N460 Z.081
N470 G3 X11.511 Z-.916 R3.6
N480 G1 X14.34 Z.498
N490 G0 Z5.5
N500 X5.156
N510 G1 Z3.5
N520 Z.2
N530 X6.3
N540 G3 X8.533 Z.022 R3.6
N550 G1 X11.362 Z1.437
N560 G0 Z5.5
N570 X2.178
N580 G1 Z3.5
N590 Z.2
N600 X5.556
N610 X8.384 Z1.614
N620 G0 Z5.5
N630 X-.8
N640 G1 Z3.5
N650 Z.2
N660 X2.578
N670 X5.406 Z1.614 M09
N680 G0 X200. Z100.
N700 T0111
N720 G50 S1500
N730 G96 S100
N740 G42 Z7. X-10. M08
N770 G1 Z5. F.2
```

```
N780 G18 G2 X0. Z0. R5.
N790 G1 X6.5
N800 G3 X11.696 Z-1.5 R3.
N810 G1 X20. Z-8.691
N820 Z-50.
N830 X25.
N840 Z-61.
N850 G40 X27.828 Z-59.586 M09
N860 G0 X200. Z100.
N890 T0100
N900 M01
N910 T0202
N930 G97 S300 M03
N950 Z-60. X33. M08
N970 G1 X29. F.1
N980 X.4
N990 X4.4
N1000 G0 X33. M09
N1010 X200. Z100.
N1050 T0200
N1060 M30
%
```

2. 自动编程与手工编程的比较

自动编程为计算机辅助编程，是图形化交互式编程，编程者可已将有限的精力集中于工艺、轨迹等方面，而不必关注简单而繁琐的坐标点计算，其编程效率高，可靠性好，应用广泛，是从事编程人员的必备基础，但自动编程的程序略显松散、冗长。

手工编程将大量的精力用于简单、繁琐且易出错的坐标点计算上，程序容易出错，但在编写固定循环指令时效果较好，原因是固定循环指令的格式与数控系统的联系较为紧密，编程软件很难适合多变的数控系统。但手工编程是基础，也是学习数控编程必须经历的过程，不容忽视，况且，自动编程的数控程序一般均需编程者手工修改，以更好地适合自身的需要。

3. 自动编程程序的手工修改与应用技巧

1）自动编程的程序尽可能选用基本指令编程，程序通用性好。虽然程序略显冗长，但具备数控程序的传输与在线加工能力。

2）自动编程的程序一般需重新阅读，手工修改，才能符合自身的要求。

3）程序修改时重点注意程序的开始与结束部分，开始部分主要看工件坐标系指令是否需要修改、主轴速度与进给量等是否合适。

4）对于成对使用的指令（M03 与 M05 或 M30、M08 与 M09、G41/G42 与 G40、G43/G44 与 G49、T□□△△与 T□□00 等）要注意前、后呼应以及放置的位置是否正确。

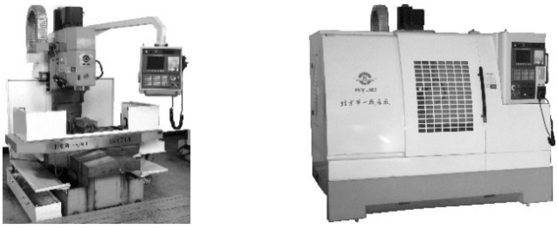
5）专业的阅读与检验数控程序的软件是必备的。CIMCO Edit 在这方面表现不错，它能够将程序与轨迹图形一一对应，修改的程序立即生效。

第 3 章　数控铣床和加工中心编程技巧与禁忌

3.1　数控铣床编程基础

数控铣床是以复杂型面铣削加工为主，兼顾钻、镗、螺纹加工等工艺的一种数控机床，如图 3-1 所示。三轴联动式数控铣床是应用广泛的基础型数控铣床，其中，生产型数控机床一般均具有防护罩。

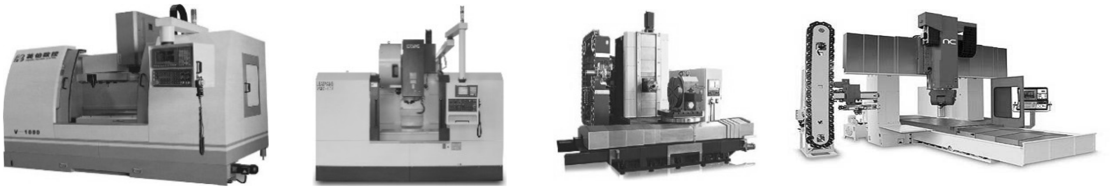
加工中心是数控铣削加工中心的简称，泛指在数控铣床基础上发展而来的数控机床。它把数控铣床的铣削、镗削、钻削、攻螺纹和切削螺纹等功能集成在一起，并配上刀库与自动换刀装置，能够根据加工特征的需要通过编程的方法自动换刀进行多工位、多工序的加工。因此，其最明显与直接的特征是增加了一个刀库，如图 3-2 所示。当然，由于其适合多刀加工，工艺功能更加完整。



a)　　b)

图 3-1　数控铣床

a）无防护罩型　b）带防护罩型



a)　　b)　　c)　　d)

图 3-2　数控加工中心

a）斗笠刀库立式加工中心　b）圆盘刀库立式加工中心

c）链式刀库卧式加工中心　d）链式刀库摆头式五轴龙门加工中心

数控铣床和加工中心按机床的结构布置方式不同有立式、卧式和龙门式等形式，其中立式加工中心应用广泛。按机床工作轴数不同分为二轴半、三轴、四轴、五轴等，其中还包括联动轴数量的不同。三轴联动数控铣床应用最为广泛，五轴加工中心是当前数控加工中心发展的主流。

编程技巧：加工中心与数控铣床编程的差异主要在刀具选刀与换刀方面，包括返回换刀点，以及选刀与换刀指令等。这方面的编程指令与方式等由机床生产厂家设计，因此，使用时以厂家使用说明书为准。

3.1.1 数控铣床程序段结构特点

数控铣床加工程序与数控车床加工程序结构基本相同，详见 1.2.1 节，此处主要分析数控铣床的程序段结构特点。

数控铣床加工程序的结构虽然与数控车床相同，但其程序段结构上仍有其自身的特点。立式三轴数控铣床与加工中心程序段的结构如下：

$$N_G_X_Y_Z_\begin{Bmatrix} I_J_K_ \\ R_ \end{Bmatrix}T_\begin{Bmatrix} D_ \\ H_ \end{Bmatrix}F_S_M_;$$

其中，N_是程序段号（任选项），N0000～N9999，或不写 ；

G_是准备功能指令，G00～G99；

X_、Y_、Z_是尺寸字，刀具沿相应坐标轴的位移坐标值，为续效字；

I_、J_、K_/R_是圆弧插补时圆心相对于圆弧起点的坐标或用圆弧半径值，非续效字；

T_是所选刀具号，数控铣床程序一般无需此项；

D_ /H_是刀具补偿号，指定刀具半径/长度偏置存储单元号；

F_是进给速度指令；

S_是主轴速度指令；

M_是辅助功能指令；

；是程序段结束符。

书写技巧与禁忌：

1）以上所列为程序段结构的一般格式，有时，在程序段前面还可能出现程序段跳过符“/”。

2）一个程序段内由一组开头是英文字母、后面是若干数字组成的信息单元“字”组成，其字母为地址符，用于识别存储地址。

3）程序段序号用 N 后跟一个不超过 4 位的数值（1～9999）组成。一般情况下，顺序号可以任意指定，甚至可以没有顺序号。但要注意，特殊情况下必须写，如固定循环指令、宏程序中的某些程序段等。

4）数控铣削系统坐标值的绝对坐标与增量坐标编程的表示方法与数控车床不同，用指令 G90/G91 指定，程序段内禁止混合编程。

5）程序段是可作为一个单位来处理的、连续的字组，包含一组操作，是数控加工程序中的一条语句。

6）刀具补偿功能字 D_/H_指的是存储器单元编号，而非存储（补偿）值。

7）程序段结束符“;”的分号是英文状态下的分号，因此，在计算机上书写程序时必须注意切换为英文输入方式书写，禁止书写为中文的分号。

8）数控铣削的程序段仍采用字地址可变程序段格式，每个字长不固定，各个程序段的长度和功能字的个数都是可变的，因此程序段内各功能字的执行先后顺序与书写先后顺序无关。

9）注意，指定圆弧圆心的功能字（I_、J_、K_ 和 R_）一般为非续效字。

10）虽然字地址可变程序段格式中对各个字的书写顺序无要求，但为了书写、输入、检查和校对的方便，各功能字在程序段中的位置习惯建议按以上的顺序排列。

3.1.2　主轴速度与进给速度控制

主轴速度与进给速度是数控铣削加工过程中两个重要的切削用量参数。

数控铣削加工中的主轴速度是机床的主运动参数。虽然数控铣削系统的主轴控制也分为恒线速度控制 G96 与恒转速控制 G97，但实际中一般均采用恒转速控制，也是数控铣削系统的默认开机状态，故数控铣床加工程序的主轴速度默认指主轴转速，单位为 r/min。

主轴速度指令格式为：（G97） S_；

进给速度指刀具与工件之间的移动速度，它虽然也有每分钟进给指令 G94 与每转进给指令 G95，但实际中很少用每转进给指令，数控铣削的开机默认进给速度控制指令是 G94，单位为 mm/min。上述指令格式表示中，G97 加括号表示若默认开机为 G97，则可以不写，下同。

进给速度指令格式为：（G94） F_；

应用技巧与禁忌：

1）由于主轴速度多指主轴转速，在线速度一定的情况下，主轴转速与刀具直径成反比，因此主轴转速的选用要考虑刀具直径的影响，刀具直径大则主轴转速应稍低。

2）数控铣削系统的主轴转速与进给速度控制与指定均未考虑铣刀齿数的多少。对多刀齿圆周铣削而言，在主轴转速与进给速度一定的条件下，铣刀齿数少，则加工表面残留面积就大，表面粗糙度值也相应增大。因此，铣刀齿数少，主轴转速应适当增加，进给速度应适当减小，这一点在精铣加工时应特别引起重视。

3）数控铣床的实际主轴转速与进给速度均可用机床操作面板上的主轴速度倍率调节开关与进给速度倍率调节开关在一定的范围内进行倍率修调，数控加工编程时要充分利用这一特点，要多注意它们的倍率调节范围与规律。一般低速调节的范围要大，这也就是数控加工程序中的主轴转速与进给速度一般取值偏大的原因。实际中一般先将倍率调整到较小进行试切，然后在首件试切时逐渐加大，直至满意为止。

4）注意比较数控铣削系统的主轴转速和进给速度的使用与数控车削系统的差异之处。

5）主轴速度指令 S_必须与辅助指令 M03（或 M04）配合使用才能直观地看到主轴的转动。否则，仅仅只是给主轴速度存储器中存入了一个速度值。

6）主轴速度 S_为续效字，开机默认值为“0”，因此开机后无法用机床操作面板上的 [主轴正转]/[主轴反转] 按钮起动主轴，必须在 MDI 方式下执行一次 S_指令才能起动主轴。手动起动主轴的转速取决于最近一次执行的 S_指令数值。

7）进给速度 F_也为续效字，在程序中第一次出现需要指定进给速度的指令（如 G01/G02/G03 等）时，必须指定进给速度 F_，否则系统将报警。

3.1.3　数控铣床工件坐标系及其建立

坐标系是数控加工过程中确定定位点与刀具移动的基础，是数控加工编程人员必须掌握的基础知识。

1. 坐标系、机床坐标系与机床参考点

在第 1 章中已初步介绍过坐标系的概念，这里以数控铣床为例进行分析。

数控铣床坐标系的确定仍然遵循 GB/T 19660 的右手定则，各种坐标系的相应坐标轴是

平行的，仅是坐标原点的位置不同，具体如图 3-3 所示。图中，O_m 为机床参考点，O_W 为工件坐标系原点。其中，机床参考点是基于机床坐标系原点 $O_{机}$（图中未示出）通过数控系统的设定与返回参考点操作确定的，大部分数控铣床回零后的绝对坐标显示设置为全零，这相当于表明机床参考点与机床坐标系原点是重合的。

分析应用与说明：

1）机床原点 $O_{机}$ 的位置由机床厂家确定，是机床机械部分设计与制造的基准，数控系统是通过设置机床参考点的过程记忆住这个机床坐标系原点的。

2）机床参考点 O_m 是数控铣床上的一个特殊点，是数控机床各坐标轴的基准点，一般设置在三个坐标轴正方向最大位置处。在该处安装相应的行程开关，工作台或主轴移动触发相应行程开关并停止移动后的绝对坐标值由系统参数 No. 1240 设定，当其设置为全零时，即相当于机床坐标系原点与机床参考点重合，所以返回坐标参考点又称为“回零”。若回零后 LCD 显示画面上显示的绝对坐标值不等于零，则这个坐标值确定的零点可认为是机床坐标系原点。例如，回零后的绝对坐标值设置为三个坐标轴的最大行程，则可认为机床坐标系原点在左前下角，而机床参考点仍在右后上角。

3）机床坐标系对于数控加工编程来说无特殊作用，一般不考虑。在图 3-4 所示的数控铣床综合坐标显示画面中有一项“机床坐标”，指的是相对于机床参考点的坐标值。

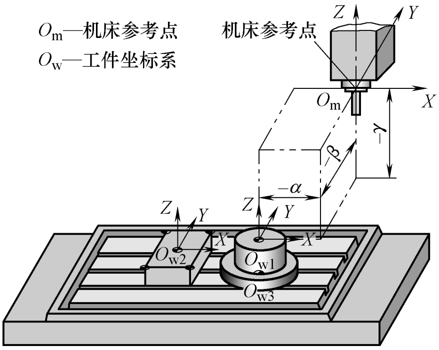


图 3-3 数控铣床的坐标系

图 3-4 数控铣床综合坐标位置显示画面

2. 工件坐标系

工件坐标系可细分为编程坐标系和加工坐标系。

编程坐标系是编程人员根据零件的结构特点在图样上指定的；而加工坐标系是根据工件毛坯在机床上的安装位置通过对刀确定的。一般要求加工坐标系与编程坐标系重合。优秀的编程人员在确定编程坐标系时应考虑工件毛坯的结构特点、安装方便性、工件坐标系对刀的方便性等因素。

应用技巧与禁忌：

1）确定编程坐标系时，尽可能将工件最长的方向设置为 X 坐标轴。

2）理论上工件坐标系可设置在任何位置，但实际中常根据毛坯的几何特征确定，如矩形工件毛坯多选在工件上表面的四个角点或几何中心上，圆柱体毛坯则选在工件上表面圆心处，如图 3-3 所示。

3）图 3-4 所示的综合位置显示画面中“绝对坐标”显示值，在未建立工件坐标系之前

显示的是相对于机床参考点的坐标，一旦建立起工件坐标系则显示的是相对于工件坐标系的坐标值。

4）建立工件坐标系时的对刀，多采用试切法进行。另外，市场上还可见各种各样的专用对刀工具，侧边对刀多采用光电式、偏心式和量表 3D 式寻边器，如图 3-5 所示。高度对刀可采用图 3-6 所示的高度对刀器，同样有光电式、量表式等。

a)　b)　c)　d)

图 3-5　寻边器

a）光电式　b）回转式　c）偏心式　d）量表 3D 式

a)　b)　c)　d)

图 3-6　高度对刀器

a）光电式　b）量表 + 光电式　c）量表式　d）量表式（带磁座）

3. 数控铣床工件坐标系的建立方法

工件坐标系是程序运行的基础，直接决定了刀具轨迹与零件加工的成败。数控铣床建立工件坐标系的方法主要有两种——G92 和 G54 ~ G59。还有一种自动设置工件坐标系的方法实际中用得不多，设置原理可参阅 2. 4. 4 节，这里不进行讨论。

（1）G92 指令设定工件坐标系　所谓设定工件坐标系，就是确定起刀点相对于工件坐标系原点的坐标位置并确定工件坐标系，其指令格式如下：

（G90）G92 X_ Y_ Z_ ；

其中，X_ Y_ Z_为刀具当前点相对于工件坐标的坐标值，如图 3-7 所示。

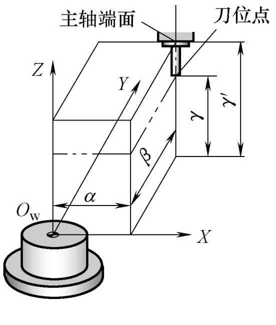


图 3-7　G92 设定工件坐标系

在图 3-7 中，若刀具当前点与工件坐标系的关系为 $X=\alpha$，$Y=\beta$，$Z=\gamma$，则执行完指令 G92 Xα Yβ Zγ 之后即可建立起工件坐标系 O_wXYZ。

应用技巧与注意事项：

1）G92 指令建立工件坐标系与刀具当前位置有关，因此程序结束前一般要将刀具返回起刀点处。

2）数控系统执行 G92 指令时，刀具本身并不会作任何移动，但此时数控系统内部会基于 α、β 和 γ 值及刀具的当前位置计算确定工件坐标系，这一点可通过数控系统的 LCD 显示画面中显示的绝对坐标值看到，即绝对坐标显示为 Xα、Yβ 和 Zγ。后续有关刀具移动指令执行过程中尺寸字的绝对坐标值就是以该坐标系为基准的，因此该指令称之为工件坐标系“设定”指令。

3）G92 指令对刀，要用到相对坐标的知识。具体参见第 4 章机床操作部分。

4）如果在刀具长度偏置期间用 G92 设定坐标系，则 G92 用无偏置的坐标值设定坐标系。刀具半径补偿被 G92 临时屏蔽。

5）G92 指令设定工件坐标系时，刀具刀位点相对于工件坐标系原点的位置是主要的，多次加工时，每次加工完成后应在刀具半径补偿与长度偏置取消的状态下返回至起刀点的位置处。

6）由于 G92 指令建立工件坐标系与刀具当前位置有关，即每次开机加工时一般必须进行一次对刀操作，故该指令适合于单件小批量生产。

7）应用 G92 指令建立工件坐标系的数控加工程序的典型结构如下：

```
O0092;                              程序名
N10(G90)G92 X100. Y100. Z150. ;     G92 指令建立工件坐标系
N20 S600 M03;                       起动主轴
N30 G90 G00 X_ Y_;                  快速移动至起刀点
N40 G43 Z_ H_;                      快速下刀，执行刀具长度偏置
N50 G01 Z_;                         进给下刀至深度
N60 G41/G42 G01 X_ Y_ D_;           启动刀具半径补偿进给切削切入
……                                  ……
N200 G40 G01/G00 X_ Y_;             取消刀具半径补偿，进给切削切出
N210 Z5. ;                          慢速提刀
N220 G49 G00 Z150. ;                取消刀具长度偏置，快速提刀
N230 X10. Y100. ;                   快速返回起刀点
N240 M30;                           程序结束，返回程序头
```

由前述分析可知，G92 指令与刀具当前位置有关，但若能与 G53 指令合理搭配，这个缺点可以克服，参见下述改进的程序 O5392。

（2）机床坐标系指令 G53 简介　G53 指令是选择机床坐标系指令，指令格式如下：

（G90） G53 X_ Y_ Z_;

其中，X_ Y_ Z_表示刀具在机床坐标系中的绝对坐标尺寸。该执行指令后，不管刀具在什么位置，刀具均能快速移动至机床坐标系中指令指定的位置。

应用技巧与禁忌：

1）G53 指令是非模态指令，仅在程序段中有效。

2）G53 指令必须在绝对坐标编程状态下有效，且指令中的坐标值 X_ Y_ Z_为绝对坐标。

3）G53 指令禁止在增量坐标编程状态下使用，否则指令无效，即若程序段为 G91 G53 X_ Y_ Z_状态，则程序段跳过不执行。特别注意的是 G91 指令为模态指令，也许在 G53 指令执行之前的程序段中曾指定过 G91。

4）执行 G53 指令之前必须执行手动或 G28 指令自动返回坐标参考点建立机床坐标系。

（3）**G92 指令与 G53 指令搭配使用技巧**　以上述的程序 O0092 为例进行改造，其仍为 G92 指令建立工件坐标系，但加入了 G53 指令搭配使用的技巧，参考程序如下：

O5392；	程序名
/N1 G91 G28 X0 Y0 Z0；	返回机床参考点，建立机床坐标系
/N5 G90 G53 X-α Y-β Z-γ；	刀具快速移动至起刀点
N10(G90)G92 X100. Y100. Z150.；	G92 指令建立工件坐标系
N20 S600 M03；	起动主轴
N30 G90 G00 X_ Y_；	快速移动至起刀点
N40 G43 Z_ H_；	快速下刀，执行刀具长度偏置
N50 G01 Z_；	进给下刀至深度
N60 G41/G42 G01 X_ Y_ D_；	启动刀具半径补偿进给切削切入
……	……
N200 G40 G01/G00 X_ Y_；	取消刀具半径补偿，进给切削切出
N210 Z5.；	慢速提刀
N220 G49 G00 Z150.；	取消刀具长度偏置，快速提刀
N230 X10. Y100.；	快速返回起刀点
N240 M30；	程序结束，返回程序头

程序分析与使用技巧：

1）程序中的 X-α Y-β Z-γ 为 G92 指令对刀时起刀点相对于机床参考点的偏置值，即 G92 指令对刀完成后，通过综合位置显示画面（见图 3-4）查询到起刀点相对于机床参考点的坐标值，并将这个坐标值更换程序中的 X-α Y-β Z-γ。

2）程序中巧妙地利用了程序段跳过符号“/”。当机床操作面板上的[程序段跳过]按键按下后，具有程序段跳过符号“/”的程序段被忽略。

3）程序运行分析。在[程序段跳过]按键释放后，程序首先执行 N1 程序段，刀具从当前位置快速返回机床参考点并建立机床坐标系，然后执行 N5 程序段，刀具自动快速定位至 G92 指令的起刀点，自动完成了 G92 指令的对刀操作，后续即可自动执行程序进行加工。执行过一次程序后，刀具返回起刀点结束程序，这时，可按下[程序段跳过]按键使程序段跳过功能有效，程序跳过 N1 和 N5 程序段，从 N10 程序段自动进行加工。

4）仔细观察程序可以看出，这样一种改进具有与 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系异曲同工的效果，即程序的执行与刀具当前位置无关。

5）读者如有条件，可以上机床运行改进的程序，体会 G53 指令与程序段跳过符号“/”的功能。

4. 工件坐标系预置与选择指令 G54 ~ G59

在 FANUC 0i 数控系统中，可以在工件坐标系存储器中设定 6 个工件坐标系［No.01（G54）~No.06（G59）］和一个外部工件零点偏移坐标系 No.00（EXT），如图 3-8 所示。它们之间的关系如图 3-8a 所示。当外部零点偏移值设置为零时，1 ~6 号工件坐标系是以机床参考点为起点偏移的。但若设置了外部工件零点偏移值，则 6 个工件坐标系同时偏移。图 3-8a 中，EXOFS 为外部工件坐标系零点偏移值；ZOFS1 ~ ZOFS6 为工件坐标系零点偏移

值。图 3-8b 为工件坐标系设置画面 1，按 MDI 操作面板上的翻页键可以切换到画面 2，显示 G57 ~ G59 偏置设置框。在工件坐标系设置画面中，若外部工件零点偏置值 EXOFS 设置为零，则外部工件坐标系零点（EXT）与机床参考点 O_m 重合。图 3-8 中还示出了 G55 工件坐标系偏置与设置的关系，图中设置的工件坐标系相对于机床参考点的坐标值为（－400.000，－200.000，－190.000）。

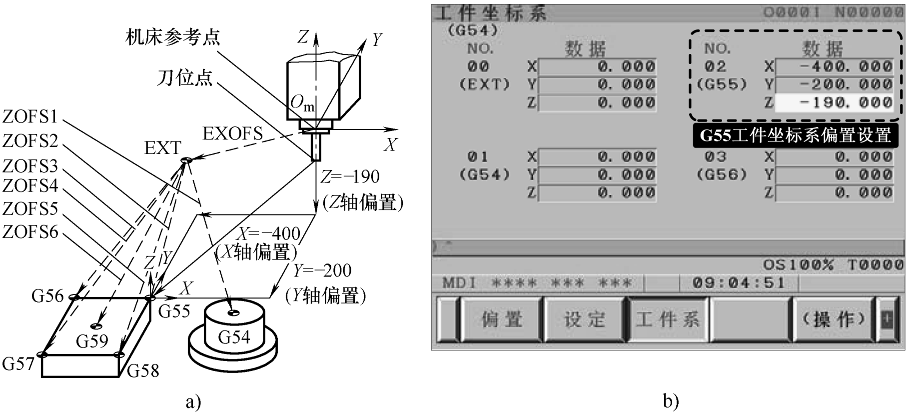


图 3-8 工件坐标系设定画面

a）工件坐标系与外部工件坐标系偏移之间关系　b）工件坐标系画面

应用技巧与注意事项：

1）G54 ~ G59 指令建立工件坐标系与刀具当前位置无关，因此应用广泛。

2）程序运行前，必须通过对刀操作在工件坐标系存储画面中设置工件坐标系，设置后必须执行一次手动返回参考点操作才能生效。

3）机床执行过锁住运行后禁止直接运行程序，必须先执行返回坐标参考点操作，否则可能出现意想不到的结果。

4）一般情况下，当电源接通时，自动选择 G54 坐标系，因此，G54 是六个指令中优先选择使用的指令。

5）由于 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系与刀具当前位置无关，因此，特别适用于夹具装夹工件这种工件坐标系固定的大批量生产场合。

6）应用 G54 ~ G59 指令建立工件坐标系的数控加工程序的典型结构如下：

O0054；	程序名
N10 G90 G00 G54 X100. Y100. Z150.；	G54 指令建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点
N20 S600 M03；	起动主轴
N30 G00 X_ Y_；	快速移动至起刀点
N40 G43 Z_ H_；	快速下刀，执行刀具长度偏置
N50 G01 Z_；	进给下刀至深度
N60 G41/G42 G01 X_ Y_ D_；	启动刀具半径补偿进给切削切入
……	……
N200 G40 G01/G00 X_ Y_；	取消刀具半径补偿，进给切削切出
N210 Z5.；	慢速提刀

N220 G49 G00 Z150.;	快速提刀，取消刀具长度偏置
N230 X10. Y100.;	快速返回起刀点
N240 M30;	程序结束，返回程序头

程序说明：由于 G54 指令建立工件坐标系与刀具当前位置无关，且执行 M30 指令后刀具长度偏置自动清除，因此，应用 G54 指令建立工件坐标系的程序，程序结束前不一定必须取消刀具长度偏置并返回起刀点，即以上程序中的 N220 和 N230 可以不写，但为了程序的规整，还是保留这种编程习惯较好。

5. 数控铣削对刀工具与试切对刀的优劣比较

数控铣床建立工件坐标系的实质是确定工件坐标系在机床坐标系中的位置，这种位置关系的建立离不开对刀。对刀的过程是通过手动操作刀具与工件“接触”建立起联系。这种“接触”直接来源于普通机床操作的“试切”，因此，试切对刀是最原始与实用的操作方法之一，图 3-5 和图 3-6 中的各种对刀工具只不过是试切对刀方法的延伸与模拟。

（1）试切法对刀　试切法对刀是通过旋转的刀具试切工件的对刀面模拟接触的，这种对刀法容易出现切除部分材料、切除的深度不易控制与测量、材料切除后不可逆等问题，造成对刀精度下降，所以，试切法对刀必须非常仔细。

试切对刀技巧与禁忌：

1）试切对刀严禁未起动主轴运转状态下与工件接触，否则，常见的问题是刀尖的破损。

2）为避免刀具切入材料，可撕一小块薄纸，并蘸上适量的机油等轻粘在对刀表面上，旋转的刀具一旦刮动该纸片，即可认为刀具与工件接触。这种方法特别适用于较为平整的已加工表面。

3）当然，若用塞尺控制刀具与对刀表面之间的距离，则刀具禁止起动旋转。

（2）对刀工具对刀　对刀工具指能够模拟刀具接触的各种工具。图 3-5 所示为模拟刀具直径方向接触的对刀工具，又称为寻边器。图 3-6 所示为模拟刀具轴向方向接触的对刀工具，其标准高度较为精准（一般为 50 ± 0.01mm），又称为高度对刀器。

寻边器对刀的优点是不存在刀具切入工件的问题，且接触的深度可逆，甚至可以不用起动主轴（如光电和量表式寻边器）。不足之处是定位精度取决于结构，如偏心式寻边器的定位精度取决于操作者的判断。这种方法最为不便的是每次对刀必须更换刀具。

高度对刀器对刀时，禁止起动主轴旋转，对刀之前必须检查与校准其标准高度。

（3）两种对刀方法的比较　试切法对刀一般为刀具直接切削工件，易造成工件表面的切削痕迹与缺陷，对已加工表面尤其如此，但其优点是对刀刀具就是待加工刀具，对刀精度高。对刀工具对刀存在更换刀具的繁琐工序，对刀工具的磨损可能造成对刀误差，对刀工具自身的制造精度也会造成适量的对刀误差，同时购置对刀工具也会增加成本。

3.2 刀具路径的规划技巧

合理的刀具路径是实现高效、优质加工的保证。从起刀点开始，下刀接近或切入材料、横向切入材料、切削加工、横向切出材料、快速提刀至退刀点、结束加工等全过程都属于刀具轨迹规划与优化的内容。

3.2.1 起/退刀点的选取技巧与禁忌

（1）起/退刀点的概念　起/退刀点指程序运行之前的刀具位置与程序结束时刀具的返回位置，一般指刀具刀位点的坐标。刀位点是描述程序轨迹的一个理论点，对于旋转运动为主的铣刀，多指刀具端面与刀具轴线的交点。

（2）起/退刀点的选择原则

1）刀具路径最短。

2）有利于对刀操作，特别是 G92 这种建立工件坐标系时不允许移动刀具位置的指令。

3）留有足够的操作空间，便于工件的测量、刀具的拆装等。

4）确保工件拆装的可靠，防止工件拆装时碰伤刀具。

5）便于加工前、后的观察，避免出现遮挡等现象。

（3）**选择技巧与禁忌**　以下讨论中，*S* 点为起刀点标志，*E* 点为退刀点标志，*S*(*E*)表示起/退刀点重合。

1）选择在工件右上角，如图 3-9 所示。图 3-9b 所示为起/退刀点选择在工件右上角，其优点为：首先，因为机床坐标参考点一般定在三坐标轴正向最大位置处，右上角的起/退刀点距离该点最近，刀具路径最短；其次，右上角退刀结束程序，工件测量与装夹操作空间充足，操作方便，操作者不易与刀具碰撞，工件拆装时不易碰到刀具。显然其优于图 3-9a。

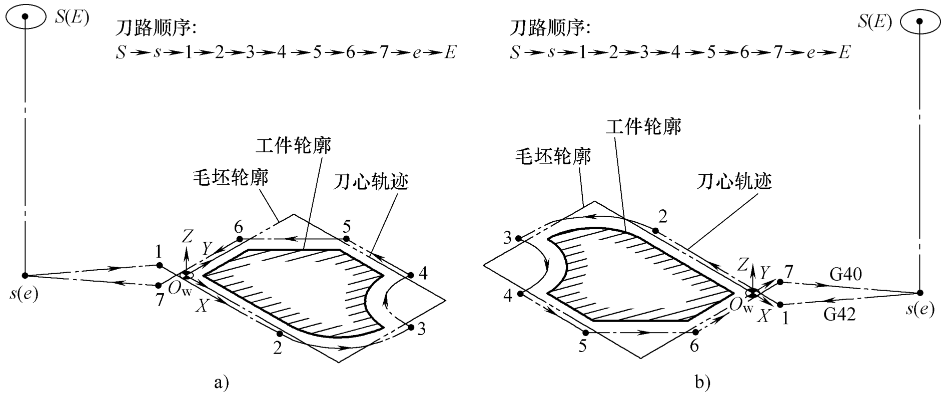


图 3-9　起/退刀点选在右上角

a）稍差　b）较好

2）选择在工件中心上方。如图 3-10 所示的闭式凸轮槽加工，毛坯为圆柱体，加工路线为：起刀点 *S*→快速定位至点 1→快速下刀至点 2→进给下刀至点 3（工件上表面）→螺旋下刀至点 4 + 圆弧插补至点 3（共 4 刀）→圆弧插补至点 4→进给提刀至点 5→快速提刀至点 6→快速返回至退刀点 *E*。工件坐标系选择在毛坯上表面中心，起/退刀点直接定在工件坐标系正上方。这种选择是基于圆柱体毛坯对刀找正，多采用“磁力表架 + 千分表”找正圆柱面对刀，若用 G92 指令建立工件坐标系时，仅需找正 *Z* 轴起刀点坐标即可，可简化对刀操作。不足之处是起/退刀点在工件上面，必须确保有足够的换刀、工件装夹与测量空间。

3）起、退刀点是否重合。图 3-9 与图 3-10 所示均为起/退刀点重合示例，图 3-11 所示为起/退刀点分离示例，其加工路径为：起刀点 *S*→快速下刀至点 1→螺旋下刀至点 2（孔深

5mm）→横向三刀扩大孔至点 3→快速提刀至点 4→横向快速移动至点 5，启动刀具左补偿→下刀至点 6→圆弧切线切入至点 7→整圆顺铣返回→圆弧切线切出至点 8→提刀至点 9→快速移动至点 10，取消刀具半径补偿→快速提刀至退刀点 E，程序结束。

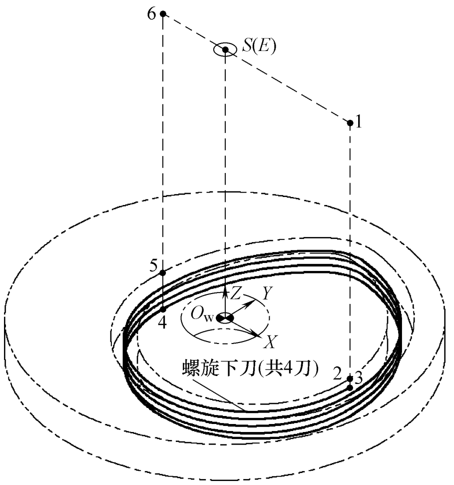


图 3-10　起/退刀点选在工件坐标系上部

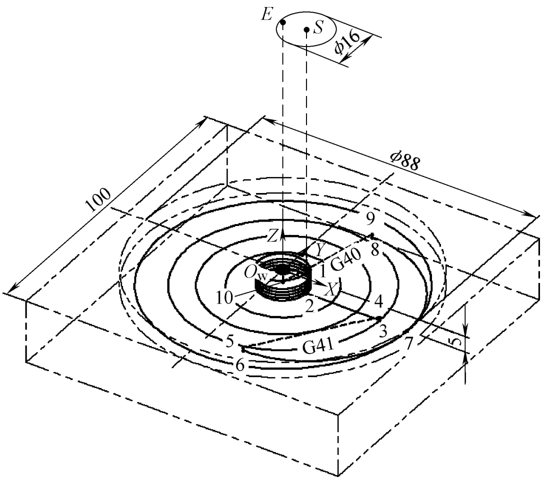


图 3-11　起/退刀点分离内腔加工

起/退刀点重合是良好的编程习惯，特别是 G92 指令建立工件坐标系时，建议采用这种编程模式，可避免多次加工时多次对刀的繁琐。但由于 G54～G59 指令建立工件坐标系与刀具当前位置无关，这时，起/退刀点是否重合，对多次运行的程序没有影响。

起/退刀点分离的优点是可方便地设置起/退刀点位置，若退刀点在工件上表面影响操作时，建议在返回退刀点后程序结束前用 G28 指令返回机床参考点（图中未示出）。但对于外轮廓加工起/退刀点分离的示例，则尽可能将退刀点选择在毛坯轮廓上方，如图 3-12 中的 E 点。图 3-12 的加工路径为：起刀点 S→快速下刀至点 1→螺旋粗铣（逆铣）圆柱→铣削结束点 2→横向快速切出至点 3→切削进给进刀至点 4，启动刀具半径左补偿→直线切线切入开始精铣圆柱面→圆弧整圆精铣（顺铣）→直线切线切出至点 5→精铣退刀至点 6→快速提刀至退刀点 E。

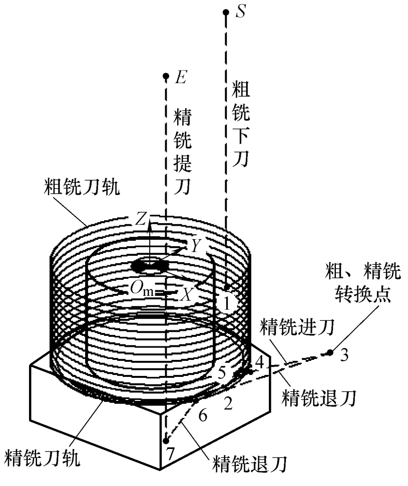


图 3-12　起/退刀点分离外廓加工

4）二维轮廓铣削且需要刀具半径补偿的加工，建议将起刀点取在毛坯轮廓之外，并将刀具半径补偿的启动与取消程序段放在切入材料前与切出材料后的程序段，如图 3-9b 所示。这是因为若在材料之上直接下刀时，一般的下刀模式是“G00 快速下刀＋G01 进给下刀”，这种连续两段非 XY 平面内的刀具移动可能导致刀具半径补偿的错误而出现过切现象，参见图 3-23。

5）起、退刀点尽可能接近起始切削段，如图 3-9 所示，必要时可以将零件进行旋转调整。

3.2.2 轴向下刀和提刀技巧与禁忌

下刀是程序开始切削前的第一个 Z 轴动作，提刀则是程序结束前的最后一个 Z 轴动作，几乎所有的数控加工程序都不可避免地会遇到这个问题。下刀与提刀的编程技巧主要有以下几点：

1. 下刀与提刀速度的选择技巧与禁忌

（1）**下刀与提刀速度的选择技巧** 下刀速度的选择要考虑与工件之间的关系。

1）在工件毛坯之外下刀时，可用快速定位指令 G00 直接下刀，如图 3-13 所示，图中刀具加工路径为：起刀点 S→快速下刀至点 s→快速定位至点 1，启动刀具半径右补偿→进给切削轮廓至点 2→快速定位至点 e，取消刀具半径补偿→快速提刀至退刀点 E，取消刀具长度偏置。

2）在工件毛坯之上直接下刀时，一般采取 G00 + G01 的方式下刀，即 G00 下刀至工件表面 3～5mm 位置处，然后转 G01 切入工件，如图 3-14 所示。假设凸轮槽已经过图 3-10 所示的刀具轨迹粗铣，这里换一把略大一点的刀具精铣凸轮槽。加工路径为：起刀点 S→快速定位至点 1→快速下刀至点 2→进给下刀至点 a（槽底）→沿 a-b-c-d-e 顺时针方向精铣凸轮槽→进给提刀至点 3→快速提刀至点 4→快速返回至退刀点 E，程序结束。

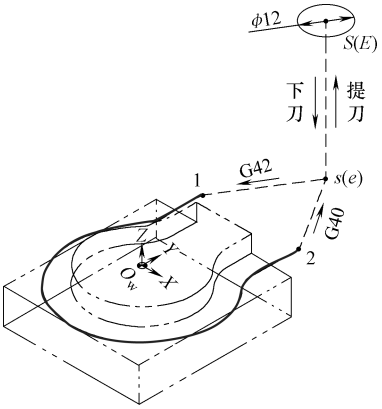


图 3-13 G00 直接下刀

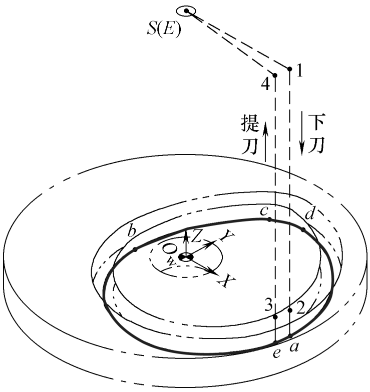


图 3-14 G00 + G01 的下刀与提刀

（2）**下刀与提刀速度的选择禁忌**

1）工件毛坯材料之上垂直下刀严禁用 G00 切入材料。

2）提刀速度的选择，一般情况下可以用 G00 直接提刀，但对于精加工且侧壁表面质量有所要求的场合，建议用 G01 提出工件表面后再转为 G00 的提刀速度，如图 3-14 的轨迹“e→3→4”段。

2. 下刀与提刀路径的选择技巧与禁忌

下刀与提刀路径的选择需考虑刀具端面的切削性能以及工件加工面表面质量的要求等因素，具体讨论如下。

（1）立铣刀底部结构分析 如下所述：

立铣刀底部结构对下刀路径的选择有直接的影响。图 3-15 所示为圆柱立铣刀常见结构。其中图 a 端面有一个沉孔及中心孔，限制了其直接下刀不宜太深；而图 b 端面刃进行改进，

端面至少有一条切削刃延伸至中心；图 c 所示为键槽铣刀，圆柱面上的圆周切削刃的螺旋角较小，端面的切削刃直接至中心，且强度较好，可直接下刀，但其仅有两条切削刃，切削表面质量稍差；图 d、e 所示为专为曲面数控加工设计的刀具，其端面切削刃至少有一条延伸至中心，因此其可用于直接下刀，但其主要用于曲面加工。

a)　b)　c)　d)　e)

图 3-15　立铣刀底部结构分析

a)、b）圆柱立铣刀　c）键槽铣刀　d）圆角立铣刀　e）球头铣刀

实际中，为适应数控加工端面下刀的需要，近年来，端面切削刃延伸至中心的改进型平底圆柱立铣刀应用广泛，三刃以上的立铣刀端面刃至少有一条延伸至中心，如图 3-16 所示。

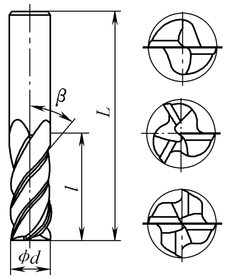


图 3-16　平底圆柱立铣刀

立铣刀圆周切削刃长度 l 对下刀路径也是有一定影响的，螺旋角 β 相当于圆周切削刃的刃倾角，β 越大，则圆周切削刃越锋利，同时端面切削刃前角增加，切削刃虽然锋利但强度有所下降。

机夹式立铣刀的结构由读者自行分析，这里不详细讨论。

（2）直接下刀方式　对于工件毛坯外下刀，一般可直接下刀至所需深度，如图 3-13 所示。

在工件毛坯材料上下刀，直接下刀要考虑铣刀端面切削刃的结构和工件下刀处的状态。其使用技巧如下：

1）对于图 3-15a 所示的圆柱立铣刀，必须先钻中心孔。对于图 3-14 所示的精加工情形，可见其直接下刀也是没有问题的。

2）若不钻中心孔直接下刀，可考虑采用图 3-15c 所示的两刃键槽铣刀。

3）图 3-16 所示的三刃以上的平底圆柱铣刀，尽可能不要过多地用于直接下刀，因为其刀尖强度稍低，刀尖易破损。

4）对于强度与韧性较大的工件加工，尽可能避免过深地直接下刀。

图 3-17 所示为一个下刀的典型示例，可用于上机练习。图 3-18 为其加工轨迹示意图。

由图 3-18 可见，外廓加工的刀具轨迹为：起刀点 S→快速定位至点 1→快速下刀至点 2→直线切削至点 3，启动刀具半径右补偿→直线切线切入外轮廓至点 4→逆时针加工至点 5（与点 4 重合）→圆弧切线切出至点 6→直线切削至点 7，取消刀具半径补偿→快速提刀至点 8→快速返回至退刀点 E。“5”字图案加工的刀具轨迹为：起刀点 S→快速定位至点 10→快速下刀至点 20（工件上表面 5mm）→进给下刀至点 30（深度 3mm）→横向切削“5”字图案至点 40→快速提刀至点 50→快速返回至退刀点 E。图中，外廓加工为工件毛坯外下刀，故直接下刀至深度 5mm 位置。“5”字图案为材料上直接下刀，因此，先快速下刀至工件上表面 3～5mm 处，然后转 G01 进给下刀至深度 3mm 位置。

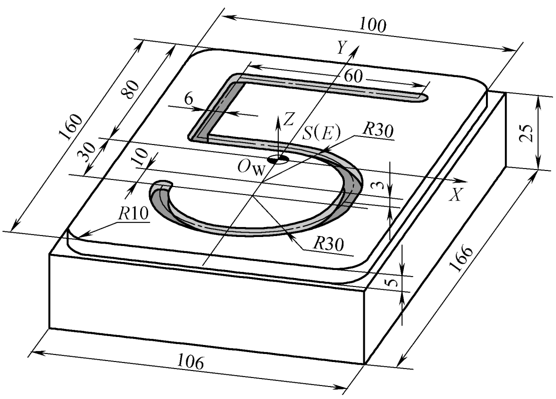


图 3-17 “5”字三维图案及尺寸

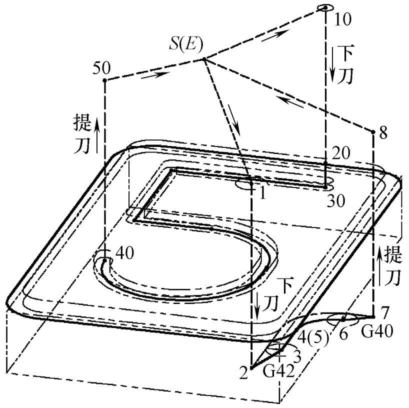


图 3-18 “5”字图案直接下刀刀轨

直接下刀是利用刀具端面的切削刃加工，所有切削刃同时加工，刀具易磨损与崩刃，特别是端面切削刃未过中心时不可能下刀太深，应用场合受到一定限制。

应用技巧与禁忌：

1）进给下刀切入材料的进给速度应小于横向切削的进给速度，一般取其1/2。

2）严禁快速下刀接近工件表面，快速移动与进给切削转换点一般取在工件表面上3～5mm位置处。

（3）斜坡下刀方式 斜坡下刀又称斜插下刀，是以刀具外圆柱面上的圆周切削刃加工为主，通过控制进给速度，可较好地调整切削条件，应用广泛。

图3-19所示为斜插下刀加工“5”字图案的示例，加工路径为：起刀点 S→快速定位至点1→快速下刀至点2（工件上表面5mm）→进给下刀至点3（工件上表面）→斜坡下刀至点4（深度3mm）→横向切削“5”字图案至点5→进给提刀至点6（工件上表面3mm）→快速提刀至点7→快速返回至退刀点 E。

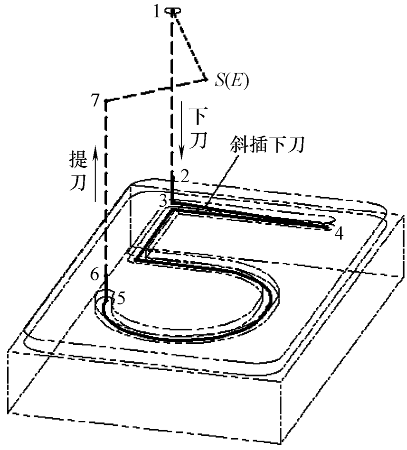


图 3-19 “5”字图案斜坡下刀刀轨

应用技巧与禁忌：

1）斜坡下刀要注意控制斜坡角度，一般取6°～8°，刀具直径大则坡角小。

2）斜坡下刀的进给速度应适当降低。

3）因为属材料上下刀，因此需先进给下刀接触工件，然后转为斜坡下刀，严禁快速下刀至工件表面。

（4）螺旋下刀方式 螺旋下刀可以认为是斜坡下刀的变种，是用螺旋插补指令实现的斜坡下刀方法。图3-20所示为螺旋下刀的应用示例，其加工路径为：起刀点 S→快速定位至点1→快速下刀至点2（工件上表面5mm）→进给下刀至点3（工件表面）→螺旋下刀至点

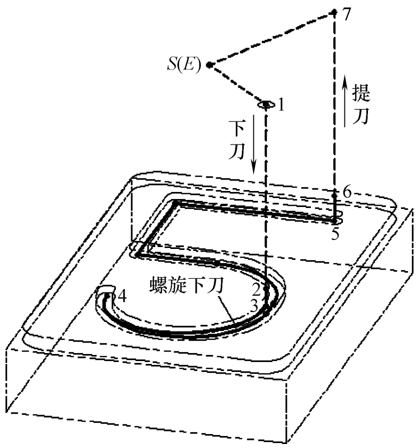


图 3-20 “5”字图案螺旋下刀刀轨

4（深度 3mm）→横向切削“5”字图案至点 5→进给提刀至点 6（工件上表面 3mm）→快速提刀至点 7→快速返回退刀点 E。

图 3-10 所示为螺旋下刀的另一个应用示例，槽深分 4 刀加工，先用螺旋下刀切削至每一层的深度，然后用圆弧插补切削一层，第 4 层切削至点 3 后还需继续用圆弧插补指令切削至点 4，将螺旋插补留下的斜坡余料去除，完成凸轮槽的粗加工。

（5）斜坡下刀与螺旋下刀的延伸应用　斜坡或螺旋下刀这种基于圆周切削刃切削下刀的方式，应用非常广泛。

图 3-21 所示为一应用示例，图中两个圆弧槽采用螺旋往复下刀，刀具路径为：起刀点 S_1→快速下刀至点 1（工件表面上 3mm）→进给下刀至点 2（工件上表面）→螺旋往复下刀至点 3（孔底）→圆弧插补铣削孔底面至点 4→进给提刀至点 5→快速提刀至退刀点 E_1。中间的槽采用斜坡往复下刀，又称为“之”字形下刀，刀具路径为：起刀点 S_2→快速下刀至点 1（工件表面上 3mm）→进给下刀至点 2（工件上表面）→斜坡往复下刀至点 3（孔底）→直线插补铣削孔底面至点 4→进给提刀至点 5→快速提刀至退刀点 E_2。矩形槽采用等深度斜坡下刀，即走完一个封闭周长下降 5mm，为保险起见，从工件上表面 0.5mm 处开始斜坡下刀，铣到槽底后，在深度不变的条件下铣削整个孔底深度至符合要求，具体刀具路径为：起刀点 S_3→快速下刀至点 1（工件表面上 3mm）→进给下刀至点 2（工件上表面 0.5mm）→沿槽中心线单向斜坡下刀铣至点 3（孔底）→深度不变铣削孔底一圈至点 4（与 3 点重合）→进给提刀至点 5→快速提刀至退刀点 E_3。

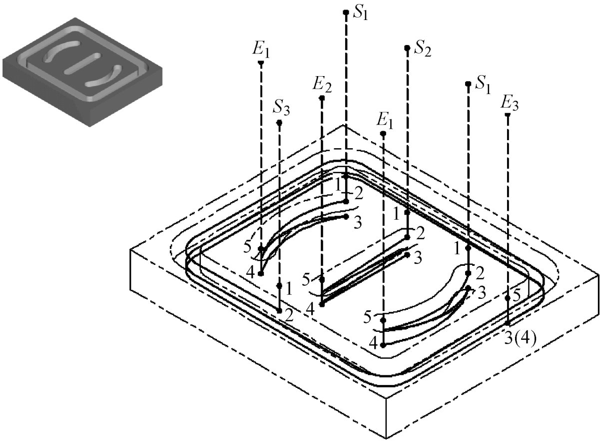


图 3-21　斜坡与螺旋下刀应用延伸（1）

图 3-22 所示为另一应用示例，分别为应用往复斜坡下刀和连续螺旋下刀方式实现型腔粗铣的下刀，精铣轮廓采用的是直接下刀。另外，图 3-10 所示为部分螺旋下刀应用示例，图 3-11 所示为连续螺旋下刀的应用示例。

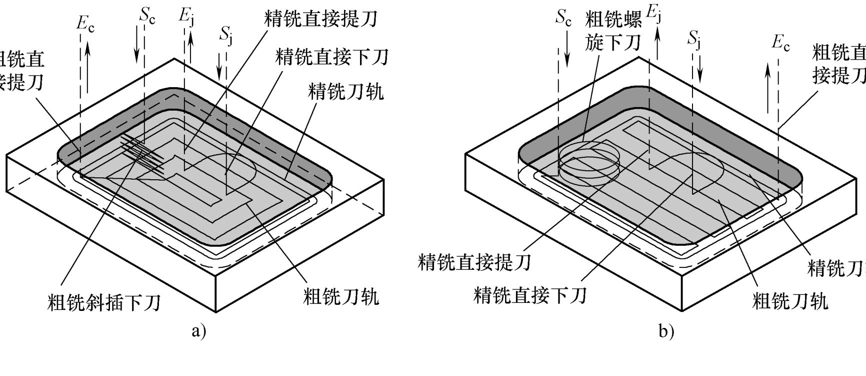


图 3-22　斜坡与螺旋下刀应用延伸（2）

a）往复斜坡下刀　b）连续螺旋下刀

（6）提刀　提刀的路径相对简单，基本均是直接提刀，仅提刀速度不同，前面已讨论。

3. 下刀/提刀路径与刀具补偿（偏置）关系的讨论

刀具补偿与偏置是同一个概念的两种不同表述，在 FANUC 0i 的官方操作说明书中，关于刀具长度部分称偏置，刀具半径则用补偿，即刀具长度偏置与刀具半径补偿。

（1）下刀/提刀路径与刀具半径补偿的关系　讨论如下：

1）刀具半径补偿的作用。刀具半径补偿功能是使刀具轨迹按一定的偏置量偏离编程轨迹移动，在二维轮廓铣削中应用广泛。要可靠地实现刀具半径补偿功能，容易忽视的一个问题是：刀具半径补偿的建立与执行期间，偏置平面内不得出现两个或更多连续的非工作平面内移动的程序段（包括 *Z* 轴移动、辅助功能、暂停指令等），否则，可能出现过切或欠切现象。另外，刀具半径补偿的建立与取消指令必须在直线程序段中执行，且一般成对使用。

2）下刀/提刀刀具路径与刀具半径补偿的关系。图 3-23 所示为容易出错的一个编程轨迹，刀具路径为：起刀点 *S*→直线移动至 *s* 点，启动刀具半径右补偿（G42）→快速下刀（G00）至点 1→进给下刀（G01）至点 2→横向切削经点 3、4、5、6、7 至点 8→快速提刀（G00）至点 *e*→快速返回至点 *E*，取消刀具半径补偿。这个刀具路径初看起来似乎没有问题，但仔细分析可以发现，执行程序段（*S*→*s* 段）启动刀具半径补偿，其后出现了两段连续的 *Z* 轴移动（*s*→1→2），CNC 系统预读的这两个程序段无法确定第 3 段（2→3 段）的补偿方向，导致程序段（*S*→*s* 段）无法建立起刀具半径补偿，刀具移动至点 2 时，刀心仍然在点 2 上，只能在 2→3 段的直线移动段建立刀具半径右补偿，移动至点 3 后才启动完成刀具半径右补偿，当然在程序段 2→3 段会出现过切现象。

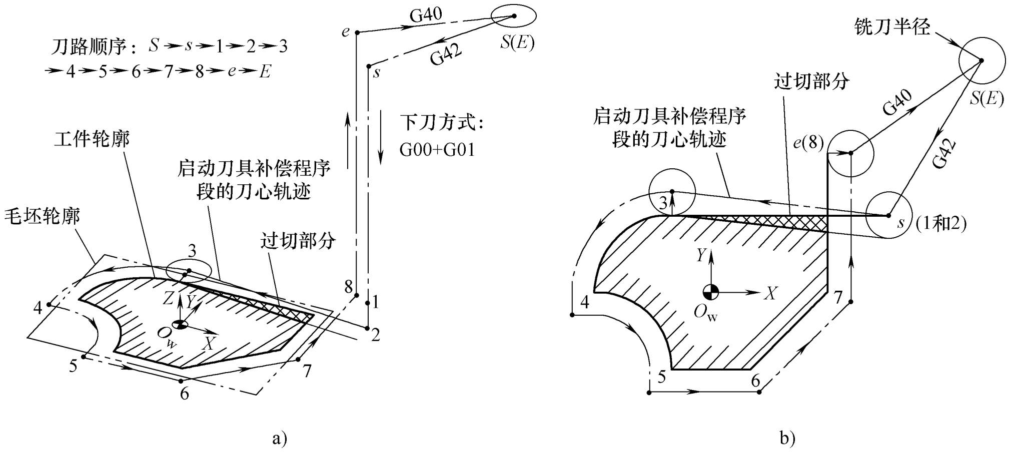


图 3-23　下刀路径与刀具半径补偿的关系

a）三维刀具轨迹　b）平面视图及轨迹

刀具半径补偿的建立与取消一般成对使用，即加工结束前一般要取消刀具半径补偿功能，确保刀具回到起刀点的位置，这一点对于 G92 指令建立工件坐标系尤为重要。仍以图 3-23为例，若程序段（*e*→*E* 段）未使用指令 G40，则刀具实际到达的位置并非图示与点 *S* 重合的位置，而是偏移一个偏置矢量（图中未示出）。

应用技巧与禁忌：

1）对于二维轮廓铣削并要实现刀具半径补偿功能时，尽量遵循先下刀、后半径补偿的

原则，如图 3-9b 所示。

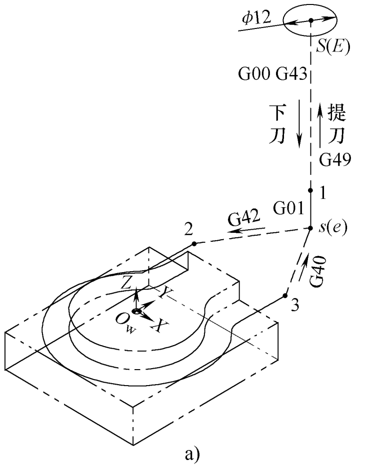
2）严禁刀具半径补偿启动后与执行期间出现两段连续的下刀轨迹。

3）刀具半径补偿的取消指令 G40 一般与启动补偿指令 G41/G42 成对使用，确保返回起刀点，这一点对 G92 指令建立工件坐标系尤为重要。提刀路径尽可能安排在刀具半径补偿取消动作之后。

（2）下刀/提刀刀具路径与刀具长度偏置的关系　讨论如下：

1）刀具长度偏置作用。刀具长度偏置是数控铣削加工，特别是多刀加工不可回避的问题。刀具长度偏置一般采用一个指令 G43，通过正、负不同的长度偏置值实现刀具长度的正、负向偏置。刀具长度偏置的结果是实现刀具下刀与提刀高度的控制，控制不好可能出现撞刀现象或 Z 轴超程问题。

2）下刀/提刀刀具路径与刀具长度偏置的关系。图 3-24a 为图 3-13 考虑长度后的刀具路径示意图，参考程序如图 3-24b 所示。刀具长度偏置安排在程序段 N30（$S\rightarrow1$），执行完该程序段，可确保刀具刀位点距工件上表面 5mm 高度。当然，该程序为规范的写法，对于图 3-24a 所示的工件毛坯轮廓外下刀，可用 G00 直接下刀至切削深度，这时，只需将程序段改写为 G43 H01 即可。退刀时一般在提刀至退刀点 E 的程序段取消刀具长度偏置，如图中的程序段 N120（$e\rightarrow E$）。这一段如果不用 G43 指令取消刀具长度偏置，当 E 点距 Z 轴行程的上止点较近时，可能出现 Z 轴超程问题。



a)

```
O3024;
N10 S800 M3;
N20 G00 G90 G54 X0. Y54. Z100.;
N30 G43 H01 Z5.;（或 G43 H01.;）
N40 G01 Z-5. F80;
N50 G42 X-8. Y32. F150 D1;
N60 N50 G01 Y16.523 F200;
N70 G02 X-10.435 Y10.776 R8.;
N80 G03 X10.435 Y10.776 R-15.;
N90 G02 X8. Y16.523 R8.;
N100 G01 Y32.;
N110 G40 X0 Y54.;
N120 G49 G0 Z100.;
N130 M30;
```

b)

图 3-24　下刀/提刀与刀具长度偏置的关系

a）刀具路径　b）参考程序

编程技巧与禁忌：

1）对于下刀动作为 G00 + G01 的刀具路径，启动刀具长度偏置指令一般放在第一段的 G00 动作上，长度偏置指令为 G43 H01 Z_，Z 轴坐标为 G00 指令下刀终点高度坐标。对于下刀动作仅为 G00 的刀具路径，用长度偏置指令为 G43 H01.，首先完成长度偏置，然后用 G00 下刀即可。

2）即使单刀的数控铣床加工程序，长度偏置的程序段还是保留为好，可用于更换刀具的加工，当然，若没有长度偏置的程序段，则需改变工件坐标系的 Z 轴偏置值等。

3）若前面使用了刀具长度偏置指令，程序结束之前应取消刀具长度偏置，确保刀具返回起刀点，这是一种良好的编程习惯。G49 指令一般安排在提刀至程序结束点的程序段，如图 3-24 中的 $e \rightarrow E$ 段。

3.2.3 横向切入和切出技巧与禁忌

横向切入/切出是指二维铣削轮廓加工时，刀具切削进入轮廓曲线以及如何从轮廓曲线切出完成加工。

1. 横向切入/切出方式的分类

横向切入/切出的典型方式主要有三种——直线直接切入/切出、直线切线切入/切出和圆弧切线切入/切出等，如图 3-25 所示。

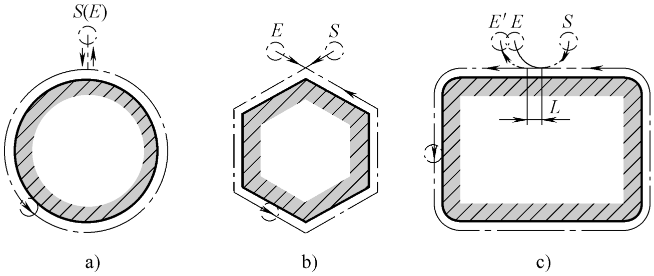


图 3-25 切入/切出方式
a）直线直接切入/切出 b）直线切线切入/切出 c）圆弧切线切入/切出

直线直接切入/切出的引入段一般垂直于切入/切出点轮廓线，较为简单，是初学者常用的方法，适合于所有场合，但在切入/切出点处，切削力变化较大，且可能留下接痕，如图 3-26 所示。切入时刀具向左上角让刀，切出时向右上角让刀，F_{xy}为横向切削力的方向。接痕的大小取决于工艺系统的刚性，切出与切入刀轨的适当搭接（见图 3-25c）所示的搭接量 L 是减小接痕的有效措施。

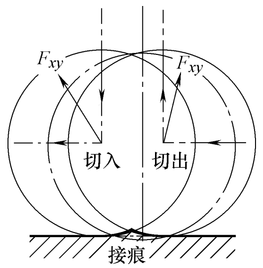


图 3-26 切入/切出接痕分析

直线切线切入/切出可有效减小切入/切出点处切削力的变化，减小接痕，但其应用受到一定限制。圆弧切线切入/切出同样接痕较小，且应用不受限制，但编程略显复杂。

2. 典型轮廓曲线横向切入/切出示例分析

以下以典型图素轮廓——圆和矩形为例进行分析。图 3-27 为圆形轮廓切入/切出示意图。

1）直线直接切入/切出可用于内、外轮廓，如图 3-27a、e 所示。切入/切出轨迹可一段编写，但其长度必须大于刀具直径的 1.5 倍，一般取刀具直径的 2 倍或更多。

2）圆弧切线切入/切出方式均增加了一段直线，用于建立/取消刀具半径补偿，如图 3-27b、f、g、h 所示。

3）外轮廓直线切线切入/切出方式如图 3-27c、d 所示，前者编程简单，但可能产生过切，后者可较好地克服过切问题。

4）内轮廓无法使用直线切线切入/切出方式，但应尽可能扩大切入/切出圆弧的半径，如图 3-27g、h 所示。

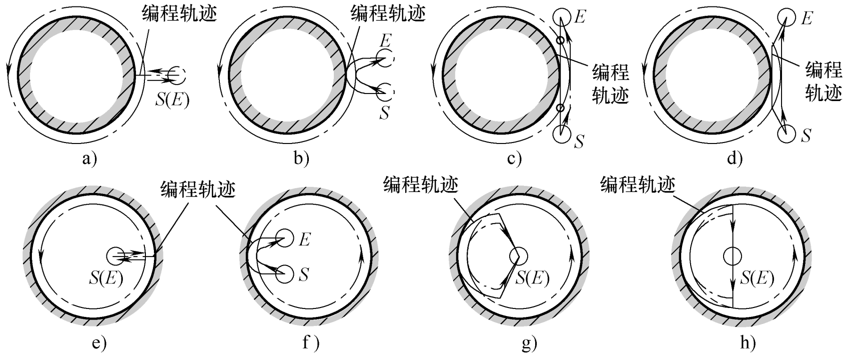


图 3-27　圆弧图素切入/切出方式

a)、e) 直线直接切入/切出　b)、f)、g)、h) 圆弧切线切入/切出

c)、d) 直线切线切入/切出

5）刀具半径补偿的启动/取消段的长度应大于刀具直径，一般可取直径的 2 倍。

图 3-28 所示为圆弧图素切入/切出方式。

1）直线直接切入/切出可用于内、外轮廓，如图 3-28a 所示。

2）圆弧切线切入/切出方式均增加了一段直线，用于建立/取消刀具半径补偿，如图 3-28d 所示。

3）直线切线切入/切出方式只能用于两直线相交处，如图 3-28b、c 所示。其中图 3-28b 的编程轨迹为直线延伸，分两段移动；图 3-28c 为折线延伸，分两段移动。

4）对于无两直线相交的图形，如图 3-28e、f 所示，可以采用直线与圆弧组合的切入/切出方式。

5）同理，刀具半径补偿的启动/取消段的长度应大于刀具直径，一般可取直径的 2 倍。

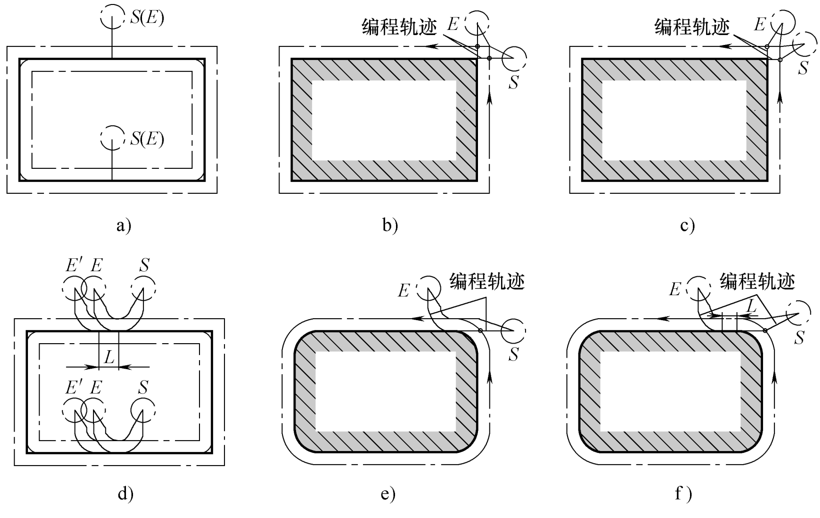


图 3-28　圆弧图素切入/切出方式

a) 直线直接切入/切出　b)、c) 直线切线切入/切出

d) 圆弧切线切入/切出　e)、f) 直线切入/圆弧切出

3.2.4 横向切入和切出方式编程技巧

1）如编程时准备采用刀具半径补偿功能，切线切入/切出段一般分成两段编程，刀具半径补偿功能的起始/结束段必须为直线，用于刀具半径补偿的建立/取消。

2）切入/切出方式的选择，受切入/切出点、切入/切出图素（直线或圆弧）、内/外轮廓等因素的影响。

3）切入/切出方式可以是以上三种方式的组合，如图3-28e、f所示。

4）起始点 S 和结束点 E 尽可能选择在毛坯轮廓之外无工件材料处，否则，其下刀轨迹必须为 G00 + G01 的方式。

3.2.5 水平分层与垂直分层加工的处理技巧

1. 水平分层与垂直分层刀具路径分析

对于二维轮廓铣削而言，同样需要粗铣与精铣工序。为有效地控制轮廓尺寸与表面质量，精铣轮廓一般使用刀具半径补偿功能，并且一刀铣出，而粗铣则需分多刀铣削，其处理方法如图3-29～图3-31所示。

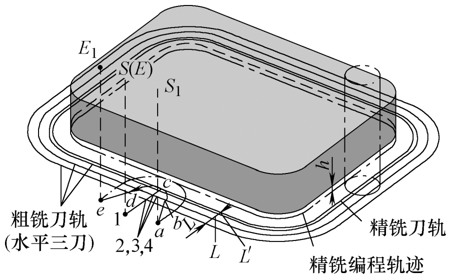


图3-29 水平分层粗铣 + 精铣

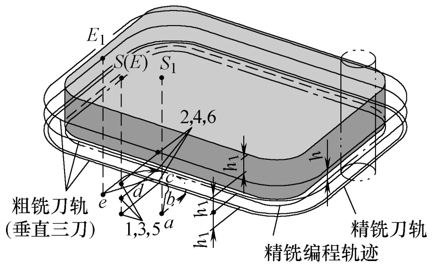


图3-30 垂直分层粗铣 + 精铣

图3-29所示为水平分层轮廓粗铣 + 轮廓精铣的加工方案。粗铣刀具路径为：起刀点 S→快速下刀至点1（超出工件下平面 h）→直线直接切入至点2→逆铣轮廓一圈返回点2→继续直接切入至点3→逆铣轮廓一圈返回点3→继续直接切入至点4→逆铣轮廓一圈返回点4→直接切出至点1→快速提刀至点 E，完成水平分层轮廓粗铣。轮廓精铣刀具路径为：起刀点 S_1→快速下刀至点 a（超出工件下平面 h）→水平直线移动至点 b，启动刀具半径左补偿→圆弧切线切入至点 c→顺铣轮廓一圈返回点 c→圆弧切线切出至点 d→直线移动至点 e，取消刀具半径补偿→快速提刀至 E_1 点，完成轮廓精铣，必要时在切入/切出点 c 处可以添加一定的叠加量。图3-11所示刀具路径便是其应用示例之一。

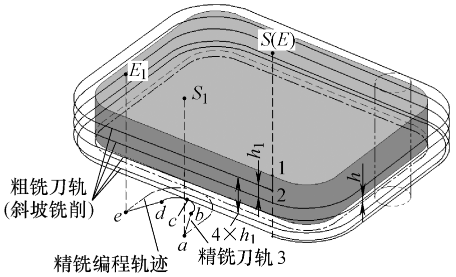


图3-31 斜坡分层粗铣 + 精铣

图3-30所示为垂直分层轮廓粗铣 + 轮廓精铣的加工方案。粗铣刀具路径为：起刀点 S→快速下刀至点1→直线直接切入至点2→逆铣轮廓一圈返回点2→水平返回至点1→快速下刀至点3→直接切入至点4→逆铣轮廓一圈返回点4→水平返回至点3→快速下刀至点5→直接

切入至点 6→逆铣轮廓一圈返回点 6→水平返回至点 5→快速提刀至点 E。以上粗铣轨迹，每层加工完成后可以不退刀而直接下刀粗铣下一层。精铣刀具路径同上。

图 3-31 所示为斜坡分层粗铣 + 精铣的加工方案。粗铣刀具路径为：起刀点 S→快速下刀至点 1（工件上表面 5mm）→切削下刀至斜坡切入点 2（工件上表面）→斜坡切削四圈至点 3（超出工件下平面 h），每圈切深为 h_1→快速提刀至 E 点。精铣刀具路径同上。图 3-12 所示刀具路径是类似的应用示例。图 3-10 也是类似的编程思想，只不过加工表面不同。

2. 水平分层与垂直分层刀具路径编程技巧

综合以上分析，可总结出**水平分层与垂直分层刀具路径编程技巧**，如下所述：

1）工件厚度不大时选择水平分层粗铣方案；反之，若工件厚度较大，则选择垂直分层粗铣的方案；

2）斜坡分层粗铣轮廓为连续铣削的过程，加工平稳，适用于工件厚度较大的工件加工。但编程较为繁琐，一般借用计算机及专业软件自动编程的方法实现。

3）粗铣最后一刀与精铣加工时的轴向加工深度均应超出工件下表面 1～2mm，即图 3-31 中的 h。

4）分层的切削厚度（图 3-29 中的 L）或深度（图 3-30、图 3-31 中的 h）可根据加工余量或工件厚度均匀分配。

5）精铣轮廓一般采用顺铣加工，并启用刀具半径补偿功能，圆弧切线切入/切出，必要时可以加入一定的搭接量。

6）尽量避免部分粗、精加工直接铣削至尺寸的加工方案，并且遵循粗、精铣削分开原则，必要时刀具也应该分开使用。

3.2.6　加工路径规划与选择技巧

加工路径规划时，应遵循以下原则：

1）先近后远。这里说的近和远，是就加工部位相对于起刀点的距离而言的。按此原则，刀具从起刀点出发尽快进入切削状态，以便缩短刀具空行程，提高切削效率。由于立式数控铣床的机床参考点常常设置在右上角，故起刀点选在右上角的情况也较多，因此，起始切削部分在右后侧的情况较多，如图 3-9 所示。

2）先外形后型腔。可使型腔表面少留下划痕。

3）精加工余量适当且尽可能均匀。精加工余量以一刀能够加工为原则，即精加工尽可能一刀加工完成。精加工余量均匀，则精加工过程中切削力变化小，加工精度与表面质量较好。精加工余量适当不是说精加工余量越小越好，一般取 0.5～1.0mm；精加工余量均匀是指加工路径规划时要合理地安排粗加工与半精加工。

4）走刀路径最短。主要在于确定粗加工及空行程的走刀路径，精加工的走刀路径基本上没有太多的变化。数控编程时，在保证加工质量的前提下，应尽可能使刀具路径最短，以节省程序执行时间，减少机床及功率的消耗。

5）程序段最少。程序段是数控程序执行时的基本单位，程序段的减少有利于简化整个加工程序，这对手动编程尤为重要。程序段少，则程序编写方便，检查容易，输入快捷。合理地使用固定循环指令和子程序调用等对减少程序段有极大的帮助。另外，宏程序对于减少程序段有非常明显的效果。由于宏程序较为专业、复杂，有兴趣的读者可参阅相关书籍，这

里不再赘述。

3.2.7　典型加工路径编程技巧与分析

1. 平面铣削刀具路径编程技巧分析

平面铣削简称面铣，主要指以面铣刀端面铣削较大面积平面的加工。

平面铣削编程技巧：

1）通常在工件外下刀至所需的深度，提刀点也尽可能确保刀具铣出平面。

2）精加工时，尽可能在工件外（空刀）改变刀具的移动方向。

3）为了得到较好的切削条件，要保证刀具中点在切削区域内，即控制切削宽度大于刀具半径，一般控制切削宽度在刀具直径的75%左右。

4）合理控制加工余量，尽可能粗、精加工两刀完成平面加工。对要求不高的表面可考虑一刀加工完成。

5）虽然数控机床的进给丝杆属无间隙的滚珠丝杆，但从加工平稳性和表面质量考虑，粗加工（切削力较大时）还是尽可能选择不对称逆铣，而精加工一般可按不对称顺铣加工选择刀具路径。尽量避免对称铣削。

6）尽可能选择机夹可转位面铣刀铣削。

7）切削路径以直线为主，进给方向尽可能与工件长边平行，以减少走刀次数。

对于平面宽度小于刀具直径50%时，尽可能不用面铣方式，若要用，则采用不对称逆铣一刀铣削完成。

平面宽度在刀具直径的75%左右时，可按图3-32所示的方式，分粗、精铣两刀加工，粗铣用不对称逆铣，精铣用不对称顺铣。

对于加工硬化明显的不锈钢等则考虑粗、精铣均采取不对称顺铣，且背吃刀量与切削厚度不宜太小。

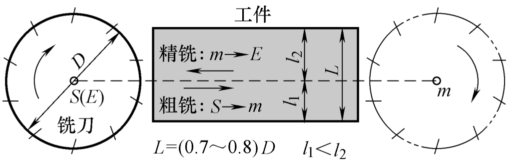


图3-32　单次走刀铣削平面

对于工件宽度大于刀具直径时，常需多次走刀铣削，只不过精铣时的背吃刀量相对较小。其加工路径主要有以下几种：

1）双向往复铣削，刀具路径如图3-33所示。图a所示为材料内部转折，效率较高，适合于粗铣加工。图b和图c所示为材料外部转折，表面加工质量较好，可用于半精加工或精加工。图中，S为切削起始点，E为切削结束点，D为刀具直径。

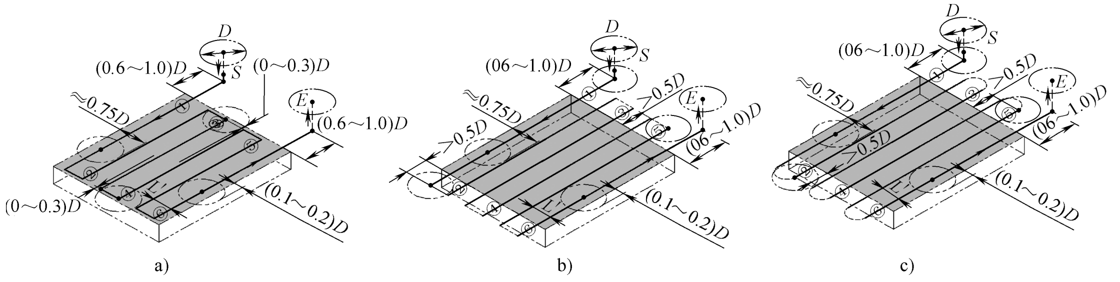


图3-33　双向往复铣削

a）内部直线转折　b）外部直线转折　c）外部圆弧转折

编程技巧与禁忌：

① 平面铣削以不对称铣削为主，铣削宽度必须大于刀具直径的一半，一般控制在刀具直径的 75% 左右。

② 普通碳钢等多采用不对称逆铣，不锈钢和耐热合金等多采用不对称顺铣。

③ 最后一刀铣削尽可能为不对称顺铣，且刀具超出工件轮廓控制在（0.1～0.2）*D*，必要时可以调整切削起点 *S* 的位置和最后一刀的行距 *L′*，且起、退刀点不一定在同一侧。

④ *S* 点下刀方式一般为“G00 + G01”，返回 *E* 点的提刀方式多为 G00，但若采用“G01 + G00”方式提刀则略显平稳。严禁材料内部下刀。

⑤ 刀具引入与引出长度一般取（0.6～1.0）*D*，精铣时中间两轨迹转折处的伸出量一般大于刀具半径，可取 0.6*D* 左右。

⑥ 中间两刀具轨迹的转折方式可以是折线（图 3-33a、b）或圆弧（图 3-33c），后者加工较为平稳，适合于进给速度较快的场合。材料内部转折采用 G01 方式（图 3-33a），材料外部转折多采用 G00 方式（图 3-33b、c）。

⑦ 双向往复铣削中途不提刀，加工效率较高，故表面加工为不对称逆、顺铣交替，加工表面铣削刀痕略为明显，但实际的表面粗糙度值并未明显增大。

2）单向顺序铣削，刀具路径如图 3-34 所示。图 a 所示为标准的单向铣削刀轨示例，每一刀的铣削方向相同，可较好地控制不对称逆、顺铣问题，表面质量较好，适合于精铣平面。图 b 所示的刀轨最后一刀铣削方向与前面刀轨反向，主要是为了控制最后一刀与前面刀轨铣削方式（不对称逆、顺铣）相同。

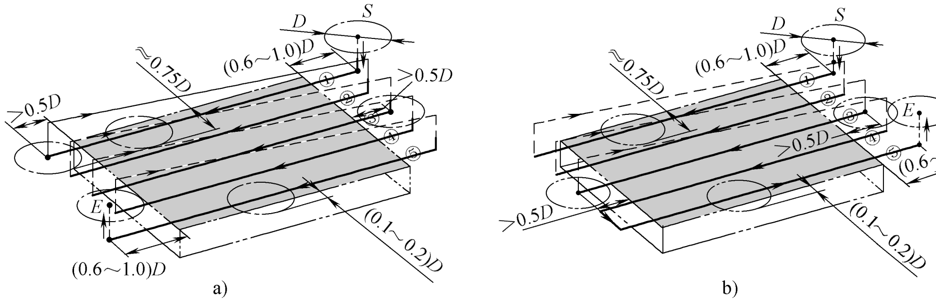


图 3-34　单向顺序铣削

a）单向铣削　b）单向铣削改造

编程技巧与禁忌：

① 单向顺序可较好地控制铣削方式，故粗、精铣均可使用，但建议仍遵循粗铣采用不对称逆铣、精铣采用不对称顺铣的原则。

② 下刀与提刀均在材料外进行，速度控制仍然采用下刀为 G00 + G01，提刀为 G00 的方式。

③ 有关引入、引出、伸出刀轨等参数与双向往复铣削相同。

④ 当采用不对逆铣时，若最后一刀铣削刀具超出工件轮廓（0.1～0.2）*D*，建议调整最后一刀进给方向（见图 3-34b），以减小刀具的冲击振动。或者调整前面的刀具路径。

3）环绕铣削，刀具路径如图 3-35 所示。图 a 所示为平行环绕铣削，刀具以长边铣削为主，从外侧向内逐渐逼近直至完成。刀轨路径为：起刀点 *S*→G00 + G01 方式下刀至点 1→铣

第①刀至点 2→快速定位至点 3→铣第②刀至点 4→快速定位至点 5→铣第③刀至点 6→快速定位至点 7→铣第④刀至点 8→快速定位至点 9→铣第⑤刀至点 10→快速定位至点 11→铣第⑥刀至点 12→快速提刀至结束点 E，完成铣削。图中以不对称逆铣为主，铣削宽度为 0.75D，最后一刀（第⑥刀）为不对称顺铣。图 b 所示为螺旋环绕铣削，刀具以外轮廓为参照螺旋向内铣削。刀轨路径为：起刀点 S→G00 + G01 方式下刀至点 s→按第①～⑨刀顺序螺旋环绕至点 e→快速提刀至结束点 E，完成铣削。图中以不对称逆铣为主，铣削宽度为 0.75D，最后一刀（第⑨刀）为不对称顺铣，该刀具轨迹若在转角处增加适当圆角过渡，切削过程更为平稳。

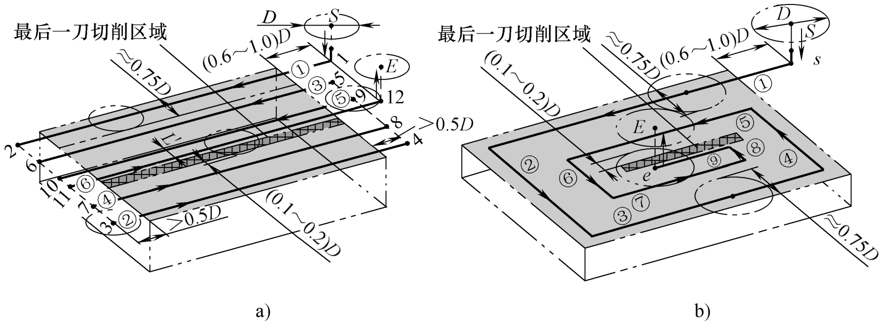


图 3-35 环绕铣削

a）平行环绕铣削 b）螺旋环绕铣削

编程技巧与禁忌：

① 这种刀具路径可较好地控制全部铣削轨迹的铣削方式为不对称顺铣或逆铣，故可适用于粗、精铣平面加工。

② 最后一刀一般应控制为不对称顺铣，且刀具超出切削区域为（0.1～0.2）D，必要时可以调整切削起点 S 的位置和最后一刀的行距 L' 等。若最后一刀的切削宽度大于刀具半径可以不考虑。

③ 有关引入、引出、伸出刀轨等参数与双向往复铣削相同。

2. 二维轮廓铣削刀具路径编程技巧与分析

二维轮廓铣削时刀具按两轴联动方式移动，通过控制切削深度实现轮廓加工，实际中应用广泛。

二维铣削轮廓除了必须考虑前述的下刀/提刀、切入/切出、水平/垂直分层等问题外，还需考虑顺铣与逆铣、刀具半径左/右补偿以及内/外轮廓之间的关系。

图 3-36 所示为一个具有外轮廓与内型孔的二维铣削加工示例。图中假设铣削路径均为逆时针方向，即：起刀点 S→直线插补至点 a，启动刀具半径补偿→圆弧切线切入至点 b→逆时针铣轮廓一圈返回点 b→圆弧切线切出点 c→直线插补至结束点 E。从分析可知，虽然外、内轮廓均采用逆时针方向铣削，但在外轮廓加工时为逆铣和刀具半径右补偿 G42，而内型孔加工为顺铣和刀具半径左补偿 G41。

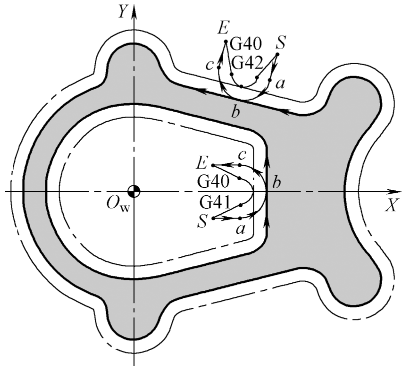


图 3-36 二维轮廓轨迹分析

图 3-37 所示为刀具直径 D 与工件圆角半径 R 之间的关系。由于刀具铣削至圆角部位时切削厚度显著增加（$a'_e > a_e$），造成切削力等突然增加，这对加工过程与加工质量有显著的影响。数控加工可选择刀具半径小于工件圆角半径，然后通过编程实现圆弧插补指令编程实现圆角加工。

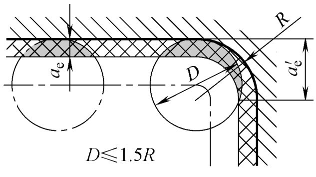


图 3-37　刀具直径与工件圆角半径的关系

编程技巧：基于表面加工质量考虑，提出以下编程技巧：

1）外轮廓二维铣削。粗铣：逆时针铣削（逆铣），刀具半径右补偿 G42；精铣：顺时针铣削（顺铣），刀具半径左补偿 G41。

2）内型孔二维铣削。粗铣：顺时针铣削（逆铣），刀具半径右补偿 G42；精铣：逆时针铣削（顺铣），刀具半径左补偿 G41。

3）二维铣削时，刀具直径不宜大于工件拐角圆弧半径的 1.5 倍，但应避免刀具半径与工件拐角圆弧半径相等，必要时可降低进给速度或采用其他刀具轨迹，如高速铣削的摆线加工轨迹等。

3. 三维曲面铣削刀具路径编程技巧与分析

三维曲面铣削时涉及三个坐标轴及其联动问题，加工编程以计算机辅助编程为主，可供选择的加工策略较多，且其选择与操作者的经验有很大关系，内容较多，这里不过多叙述，仅就影响加工策略选择的几个问题进行讨论。

三维曲面铣削一般仍涉及粗铣与精铣，有时还设有半精铣加工。粗铣以去除材料为主，要求加工效率高，一般要分多层加工。精铣以加工精度和表面粗糙度为主，一般一刀加工完成。半精铣可认为是粗铣与精铣之间的过渡铣削，是在粗铣加工的基础上进一步去除材料，为精加工留下一层适当厚度且均匀的加工余量。

三维曲面铣削加工用到的刀具主要包括（平底）圆柱立铣刀、球头铣刀和圆角（又称圆鼻）立铣刀。各种刀具的主要切削刃与加工用途及加工方式有关。

圆柱立铣刀一般为平底外形，端面切削刃是否过中心与刀具制造方式有关。圆柱面上的圆周切削刃为主切削刃，但端面切削刃，特别是专门制作的过中心切削刃的平底圆柱立铣刀（见图 3-16）也有较好的加工效果。圆周切削刃的螺旋角与切削刃数对刀具选择也是有影响的，螺旋角相当于刃倾角，螺旋角大，则切削刃显得锋利且加工平稳，适合于精铣加工。而切削刃数少，则容屑槽容积大，适合于粗铣加工。故一般三刃立铣刀常称为粗铣立铣刀，而四刃及以上的立铣刀则称为精铣立铣刀。需要说明的是，被称为键槽立铣刀的两刃圆柱立铣刀，专门考虑了键槽铣削轴向下刀问题，因此，其端面切削刃常被称为主要切削刃，但圆周切削刃也有较好的切削效果，只是螺旋角较小，切削刃数较少，从而限制了进给速度的提高。

球头铣刀（见图 3-38）是专为曲面精铣加工而设计的铣削刀具，有几个值得注意的问题：一是其主切削刃为球头切削刃，圆周切削刃的加工效果较差，建议尽量避免参与切削；二是球头切削刃上各点的切削速度不同，靠近轴线中心处切削速度接近于零，这在三轴立式数控铣床上无法回避，限制了表面质量的提高；三是加工过程中必然存在残留面积，对表面粗糙度影响较大。

图 3-38 中，球头切削刃上的切削速度与切削深度 a_p 有关，其关系如下：

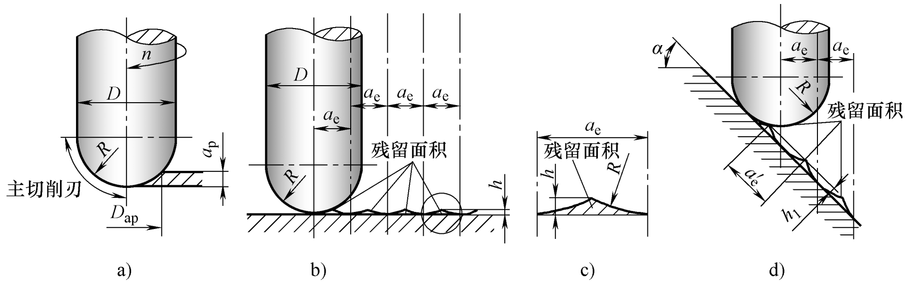


图 3-38 球头铣刀

a）球头部位 b）平面铣削 c）残留面积示意 d）斜面铣削

$$v_c = \frac{\pi D_{ap} n}{1000}$$

$$D_{ap} = 2\sqrt{a_p(D - a_p)}$$

式中，D_{ap}为实际切削直径。

以上公式说明，球头铣刀主切削刃上各点的切削速度是不相等的，中心处的速度为零，圆周点处的速度最大。

残留面积高度与切削宽度 a_e（刀具路径的行距）有关，其关系如下：

铣削平面时： $$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2}$$

铣削斜面时： $$h_1 = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e'}{2}\right)^2} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2\cos\alpha}\right)^2}$$

以上公式说明，在切削宽度 a_e一定的条件下，斜面铣削的残留面积高度更大。若进给方向与斜面垂直，则相当于平面铣削，其残留面积可以减小，这对选择刀具路径具有指导意义。

圆角立铣刀多为机夹式结构，整体式圆角铣刀并不多见，如图 3-39 所示。机夹式圆角立铣的刀片多为圆形，装在刀杆上的两片刀片构造成圆角立铣刀，这种圆角铣刀的切削深度不能超过刀片半径，端部切削刃一般也不过刀具中心，因此不宜端面下刀，但其不存在切削速度为零的情形，故其加工条件优于球头铣刀。圆角立铣刀可用于曲面的半精加工和小曲率曲面的精加工。

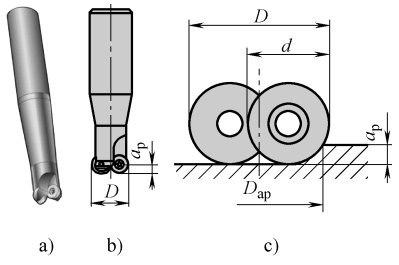


图 3-39 圆角立铣刀及其实际切削直径

a）外观图 b）平面图 c）实际切削直径

与球头铣刀类似，圆角立铣刀的实际切削直径与切削深度有关，其计算公式为

$$D_{ap} = D - d + \sqrt{d^2 - (d - 2a_p)^2}$$

编程技巧与禁忌：

1）三维曲面粗铣时，一般选择圆柱立铣刀分层铣削，切削宽度（刀路行距）尽可能大，可达刀具直径的75%。精铣加工时，若曲面曲率较小，可考虑选用圆角立铣刀。若采用球头铣刀，则由于球头中心处切削速度极低，其加工表面质量不可能很高，除非利用五轴加工中心将刀具偏斜适当角度。

2）三维曲面精铣时，精加工余量尽可能均匀，必要时采用圆角立铣刀进行过渡性的半精铣加工。

3）由于球头铣刀实际切削直径小于刀具公称直径，因此同尺寸球头铣刀的切削转速可达圆柱立铣刀转速的 2 ~3 倍。

4）尽量避免球头刀具进行粗铣加工。尽量避免球头铣刀的圆周切削刃参与切削，即切削深度 a_p 不得大于刀具半径。

5）球头铣刀的进给运动方向尽可能垂直于斜面，以减少残留面积。

3.2.8　整圆编程与螺旋编程及其应用

1. 数控铣削的整圆编程与处理

（1）圆弧插补指令分析　圆弧插补指令 G02/G03 指定机床的 X、Y、Z 轴以其中两轴联动的方式使刀具按给定的进给速度在指定的工作平面作圆弧插补运动。圆弧插补指令必须在指定的工作平面中移动，立式铣床默认为 G17 平面，此时的圆弧插补指令格式可简写如下，插补方向判断图解可简化为图 3-40。

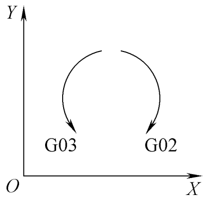


图 3-40　圆弧插补方向判断

指令的格式如下：$\begin{Bmatrix} \mathrm{G02} \\ \mathrm{G03} \end{Bmatrix}$ X_Y_ $\begin{Bmatrix} \mathrm{I_J_} \\ \mathrm{R_} \end{Bmatrix}$ F_；

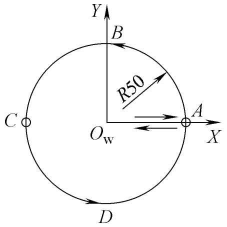
指令中各参数的含义可参见 1.2.4 节中关于圆弧插补指令的说明。

（2）选择技巧与禁忌

1）圆弧插补指令只能在指定的工作平面中移动。

2）按指定圆心方法不同，圆弧编程指令有两种写法：一种是 I_ J_指定圆心，可称为圆心坐标编程；另一种是 R 指定圆心，可称为圆弧半径编程。前一种更通用，后一种更直观。

3）整圆编程只能用圆心坐标编程，若用圆弧半径编程，可变通为两段（或以上）圆弧半径编程，如图 3-41 所示。图中为一个整圆，假设起、对刀点均为圆心 O，则其数控程序可见图 3-41b、c。



a）

```
O3411;(圆心坐标编程)
G92 X0 Y0 Z0;
G00 X50.;
G03  I-50.F200;  整圆 ABCDA 编程
G00 X0;
M30;
```

b）

```
O3412;(圆弧半径编程)
G92 X0 Y0 Z0.;
G00 X50.;
G03  X-50.R50.F200;  圆弧 ABC 编程
G03 X50.R50.;        圆弧 CDA 编程
G00 X0;
M30;
```

c）

图 3-41　整圆编程

a）图例　b）圆心坐标编程程序　c）圆弧半径编程

4）圆弧插补指令中指令圆心的尺寸字 I_ J_和 R_均为非续效字，即非模态，每个程序段均必须重新写。

5）圆弧插补指令刀具移动的进给速度为刀位点的移动速度，若启用了刀具圆弧半径补偿，则是沿补偿后的圆弧测量的。

6）圆弧插补指令不能用于刀具圆弧半径补偿指令的启动与停止程序段。

2. 螺旋线编程及其应用分析

（1）螺旋插补指令 G02/G03 分析　螺旋插补是在圆弧插补程序段的基础上加上非圆弧插补轴同步直线移动形成螺旋移动轨迹的指令，如图 3-42 所示。

以立式铣床为例，其螺旋插补指令的格式为：

$$(G17)\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix} X_\ Y_\ \begin{Bmatrix}I_\ J_\\R_\end{Bmatrix} Z_\ F_\ ;$$

指令中的 Z 轴是圆弧插补轴之外的移动轴，其他部分与圆弧插补指令相同。F 指定的是沿圆弧插补的进给速度，如图 3-42 所示。而沿直线轴的进给速度如下：

$$F_Z = F \times \frac{\text{直线轴的长度}}{\text{圆弧的长度}}$$

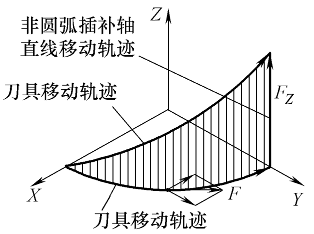


图 3-42　螺旋插补移动

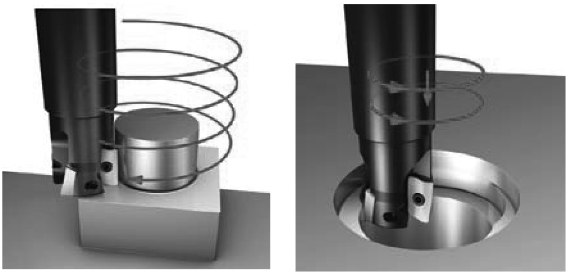


图 3-43　螺旋铣削内孔与外圆

（2）编程技巧与禁忌

1）刀具半径补偿只用于圆弧移动部分。

2）螺旋插补的程序段中不能使用启动与取消刀具半径补偿和长度偏置指令。

3）直线移动轴的进给速度钳制可由系统参数 No. 1404#0（HFC）设定。

4）螺旋插补指令可用于型腔铣削中的螺旋下刀、外圆或内孔圆柱面粗铣加工等。图 3-43 所示为铣外圆柱面与圆孔。

3. 圆柱面加工示例及分析

图 3-10 所示为凸轮槽螺旋下刀加工的应用示例，加工程序参见 3. 5. 3 节。

图 3-11 所示为螺旋下刀在型腔加工上的应用示例，加工刀具为 ϕ16 圆柱立铣刀，加工尺寸参见图 3-11。加工程序如下：

O3111；	程序名
N10 G90 G55 G00 X7. 5 Y0. Z100；	选择 G55 坐标系，快速定位至起始点 S
N20 M03 S500；	主轴正转，转速为 500r/min
N30 G43 Z2. H01；	快速下刀至点 1（工件上表面 2mm）
N40 G02 I-7. 5 Z-1. 0 F200；	螺旋下刀铣一整圆，深入材料 1mm
N50 I-7. 5 Z-2. ；	螺旋下刀铣一整圆，螺距 1mm
N60 I-7. 5 Z-3. ；	螺旋下刀铣一整圆，螺距 1mm
N70 I-7. 5 Z-4. ；	螺旋下刀铣一整圆，螺距 1mm
N80 I-7. 5 Z-5. ；	螺旋下刀铣一整圆，螺距 1mm，至孔底深度

N90 I-7. 5 Z-5. ;	深度不变整圆铣底面至点 2 结束
N100 G01 X15. 5;	横向移动准备铣扩第 1 刀
N110 G02 I-15. 5;	顺时针铣整圆铣扩第 1 刀
N120 G01 X23. 5;	横向移动准备铣扩第 2 刀
N130 G02 I-23. 5;	顺时针铣整圆铣扩第 2 刀
N140 G01 X31. 5;	横向移动至点 3,准备铣扩第 3 刀
N150 G02 I-31. 5;	顺时针铣整圆铣扩第 3 刀
N160 G01 Z-4;	提刀 1mm 至点 4
N170 G41 G00 X8. Y-32. D01;	快速移动至点 5,启动刀具半径补偿
N180 G01 Z-5. ;	下刀 1mm 至点 6
N190 G03 X40. Y0 R32. ;	圆弧切线切入至点 7
N200 I-40. ;	逆时针整圆铣削返回点 7
N210 X8. Y32. R32. ;	圆弧切线去切出至点 8
N220 G01 Z-4. ;	提刀 1mm 至点 9
N230 G40 G00 X0 Y0;	快速移动至点 10,取消刀具半径补偿
N240 G00 Z100. ;	快速提刀至结束点 *E*
N250 M30;	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析:

1）程序采用螺旋下刀至孔底，并整圆铣削出底平面，对刀具端面切削刃无特殊要求，且不需工件上钻中心孔。

2）粗铣（程序段 N30～N150）采用逆铣，精铣（程序段 N180～N210）采用顺铣，符合铣削加工工艺要求。

3）精铣程序部分采用了刀具半径补偿功能，可方便控制圆孔直径。采用圆弧切线切入/切出，使内圆切入点接痕最小。

4）采用 G55 指令建立工件坐标系，工件坐标系原点的设置与刀具当前位置无关，结束点 *E* 不必回到起始点 *S*。

下面再以图 3-12 所示圆柱面加工为例，探讨螺旋指令与整圆加工指令加工圆柱面的问题。

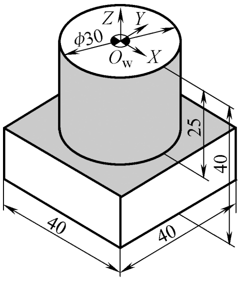


图 3-44　圆柱加工示例

图 3-44 所示为加工件几何参数。由于外圆柱面较高，用整圆铣削粗加工显然有一定难度，故采用螺旋指令粗铣。考虑到圆柱直径一般有尺寸精度要求，因此再用具有刀具半径补偿的整圆加工指令精铣一刀。此处选择 ϕ16mm 的立铣刀，*Z* 轴进刀速度为 2mm/r，工件坐标系定在工件上表面圆心处。加工程序如下，刀路轨迹参见图 3-12。

O3440;	程序名
N10 G90 G55 G00 X23. 5 Y0 Z100;	选择 G55 坐标系,快速定位至起始点 *S*
N20 M03 S600;	主轴正转,转速为 600r/min
N30 Z2;	快速下刀至工件上表面 2mm 处
N40 G03 I-23. 5 Z0 F200;	螺旋下刀至工件上表面处
N50 M98 P0123451;	调用子程序 O3451 执行 12 次至 24mm 深度处
N60 G90 G03 I-23. 5 Z-25. ;	绝对编程,螺旋铣削至 25mm 深度处
N70 G03 I-23. 5 Z-25. ;	整圆铣削修整底面

N80 G00 X30. Y30.;	快速退刀至精铣起点
N90 G41 G00 X15. Y10. D01;	快速移动至直线切线切入起点,启动刀具半径补偿
N100 G01 Y0 F100;	直线切线切入
N110 G02 I-15.;	整圆铣削
N120 G01 Y-10.;	直线切线切出
N130 G40 G00 X30. Y-30.;	快速退出至精铣结束点
N140 G00 Z100.;	快速提刀
N150 M30;	程序结束,返回程序头
O3451;	子程序名
N10 G91 G03 I-23.5 Z-2. F200;	增量编程,向下螺旋插补,导程2mm
N20 M99;	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析：

1）螺旋指令编程粗铣＋整圆编程精铣这种组合可广泛应用于圆柱面加工，适当改造可用于圆孔加工。

2）精铣程序引入刀具半径补偿功能，可较好地控制圆柱直径加工精度。

3）对于这种需要多程序段螺旋加工的情况，采用子程序调用功能，可显著减少程序段数量。当然用宏程序编程也有这个优点。

4）注意子程序调用必须用增量坐标编程。别忘了返回主程序后改回绝对坐标编程（程序段 N60）。

5）尽量选用稍大直径的铣刀，以减少让刀现象，提高加工精度。

6）尽可能避免整圆加工方式直接粗铣。

3.3　刀具半径补偿与长度偏置及其应用

刀具补偿（偏置）功能是衡量数控系统功能强弱的标志之一。现代数控系统基本都具有刀具补偿功能，包括刀具半径补偿与刀具长度偏置。刀具补偿功能是实际加工中常用的基本功能，特别是多刀加工，不利用刀具补偿功能，其编程与加工将变得非常困难甚至无法实现。

3.3.1　刀具半径补偿功能与动作分析

1. 刀具半径补偿原理与指令

（1）问题的引出　在二维铣削加工过程中，刀具按一定的运动路线移动，而运动路线可认为是一个点移动的轨迹，这个点称为刀位点。数控铣床的刀位点一般为刀具中心线与切削端面的交点。实际上，刀具是一个圆柱体，二维铣削过程主要是依靠刀具圆柱面上的圆周切削刃实现加工，圆周与工件轮廓接触点可称为切削点。显然，刀位点与切削点是不重合的。切削点的包络轨迹形成了零件轮廓，而刀位点的移动轨迹是一条类似于工件轮廓偏置后的类零件轮廓形状。

以图3-45为例。刀具移动轨迹为：起刀点 S→①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→退刀点 E。切削点包络轨迹为粗实线所示，其加工出零件轮廓，刀具中心即刀位点，其运动轨迹为点画线所示，基本上等于工件轮廓偏置一个偏置矢量（假设等于刀具半径）后的形状。

图 3-45 中，在工件轮廓线基础上，增加引入/引出段与启动/取消补偿段，编程轨迹即图中实线所示轨迹。显然，编程轨迹可不考虑刀具直径，而在编程轨迹的基础上，通过偏置矢量可确定刀心移动轨迹。也就是说，可以用一个数控程序，通过改变不同的偏置矢量确定刀心轨迹，完成零件的加工，这个偏置矢量值就是刀具半径补偿值。这种编程与加工的思想就是刀具半径补偿原理。

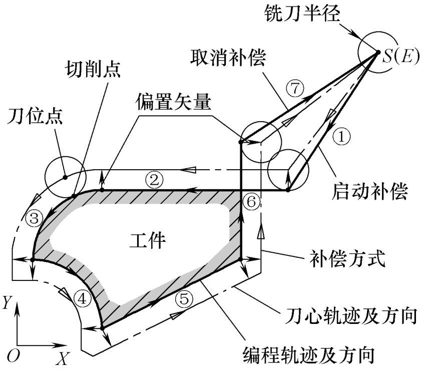


图 3-45　刀具半径补偿原理

（2）刀具半径补偿指令 G41/G42/G40　从图 3-45 可见，基于刀具半径补偿功能数控加工，首先必须启动刀具半径补偿，然后在补偿方式下移动刀具，加工结束前一般要取消刀具半径补偿。为此，数控系统设计了三个刀具半径补偿指令 G41/G42/G40，数控系统依据指令 G41/G42 并与指令 G00/G01 一起确定偏置矢量的大小和方向，控制刀具运动的轨迹。

立式数控铣床刀具半径补偿指令的格式为：

$$(\mathrm{G17})\begin{Bmatrix}\mathrm{G41}\\ \mathrm{G42}\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}\mathrm{G00}\\ \mathrm{G01}\end{Bmatrix}\ \mathrm{X_\ Y_\ D_\ F_};$$　　启动刀具半径补偿

……　　刀具补偿方式运动

$$\mathrm{G40}\begin{Bmatrix}\mathrm{G00}\\ \mathrm{G01}\end{Bmatrix}\ \mathrm{X_\ Y_}\ ;$$　　取消刀具半径补偿

其中，G17 用于指定刀具半径补偿工作平面，立式数控铣床的默认设置为 G17，可以不写。

G41/G42 为刀具半径左/右补偿指令。

G40 为取消刀具半径补偿指令。

G00/G01 为刀具半径补偿的启动与取消程序段。

X_Y_为启动/取消刀具半径补偿程序段的终点坐标，可用绝对或增量坐标编程。

D_为刀具半径补偿存储器编号，由地址符 D 加 1～3 位非零数字组成。

F_为 G01 指令程序段指定的进给速度。

（3）编程技巧与禁忌

1）刀具半径补偿指令的应用必须在指定的工作平面中进行。以上仅为立式铣床的指令格式。实际应用中，很多程序未见该指令，这是由于数控机床开机默认指令设置，如立式铣床开机默认为 G17。

2）刀具半径补偿指令 G41/G42/G40 是同组的模态指令，可以相互注销。系统开机默认为 G40。

3）使用刀具半径补偿功能编程，是按零件轮廓线编程，程序通用性好，是二维铣削轮廓常用的编程方法，应用广泛。

4）刀具半径的左/右补偿判断方法是：沿着刀具编程运动方向看，刀具中心往左侧偏置的称为左补偿，往右侧偏置的称为右补偿，如图 3-46 所示。实际应用中，刀具半径左/右侧补偿的使用要与加工表面的位置（内/外侧）、走刀路线和铣削方式（顺/逆铣）等联系起来选择，如图 3-47 所示。

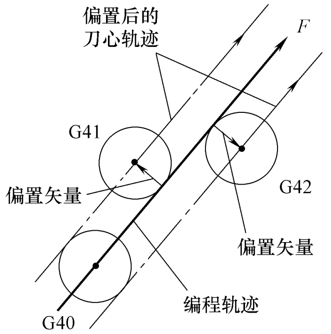


图 3-46　G40 与 G41/G42 的关系

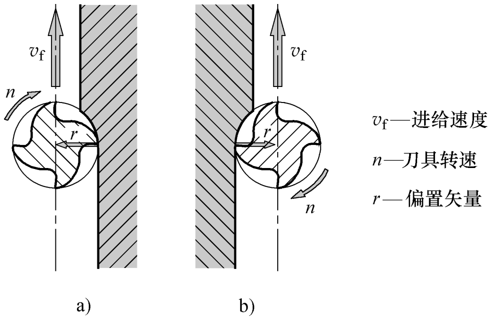


图 3-47　刀具左/右补偿与顺/逆铣
a）G41/左补偿/顺铣　b）G42/右补偿/逆铣

5）以上讨论刀具半径左/右补偿是基于刀具半径补偿值为正值的情况，这是刀具半径补偿指令的常规用法。但若补偿值为负值时则刚好相反，即左、右补偿对调。

6）刀具半径补偿的建立与取消必须在直线移动程序段 G00/G01 中进行。禁止在圆弧插补指令 G02/G03 程序段建立与取消刀具半径补偿，否则系统产生报警。

7）编程轨迹的内圆角半径不得小于刀具半径补偿值，否则系统产生报警。同样，编程轨迹的沟槽底部较小，刀具无法进入时，也会产生报警。

8）刀具补偿的建立最好在零件轮廓切削之外的程序段进行，如图 3-24 所示。

9）启动刀具半径补偿和其后的补偿执行方式中，数控系统处理刀具半径补偿时预读了两个程序段，即当前正在执行的程序段后不得有两段或两段以上的非工作平面中移动的程序段，否则无法建立刀具补偿而出现过切现象，参见图 3-23 的分析。

10）刀具半径补偿执行期间，不要重复使用刀具半径补偿指令 G41/G42。同时，尽量不要在半径补偿执行期间改变刀具半径补偿值。

11）指令中的 D 代码指定的是刀具半径补偿存储器的地址（即补偿号），补偿存储器中的数值才是刀具半径补偿值，D 代码为续效字，相当于模态值。

12）指定指令 G40 即进入刀具半径取消方式，此时刀位点返回至与编程轨迹重合状态。D00 是系统保留的刀具补偿号，其刀具补偿值永远为 0，指定刀具补偿号 D00 与执行 G40 指令效果相同。另外，系统开机默认为 G40 方式，执行指令 M30 或 M02 以及按下 MDI 面板上的 RESET 键也进入 G40 方式。

13）刀具半径补偿值必须在程序执行之前通过 MDI 面板操作输入。另外系统还提供了编程输入指令 G10，可用程序输入补偿值。

14）刀具半径补偿存储器 D_中一般存入的是刀具半径值，也可用参数 No. 5004 #2（ODI）设定为直径指定。

15）G41/G42 与 G40 一般成对使用，即程序结束前一般使用 G40 取消刀具补偿，使刀具返回起刀点位置，这是一个良好的编程习惯。

16）实际程序中可能在 G41/G42 程序段中未见 F 指令，这是因为 F 为续效字，前面可能已经指定。

17）刀具半径补偿的地址符默认设置为 D，也可由参数 No. 5001#2（OFH）设定为与刀具长度偏置相同的地址符 H。

2. 刀具半径补偿与运动轨迹分析

（1）问题的提出　应用刀具半径补偿指令的数控程序，其编程轨迹为工件轮廓线，刀心轨迹与其不重合。研究这种变化对确定合理的刀具路径，避免出现不必要的过切现象有积极的指导作用。笔者认为，学习数控编程，详尽描述数控程序的刀具轨迹是必须掌握的基本功之一。

（2）符号约定　下面分析刀具半径补偿运动轨迹主要用图解符号约定，见表 3-1。

表 3-1　刀具半径补偿图解符号约定

P	表示单程序段执行一次的位置
PP	表示单程序段执行二次的位置
PPP	表示单程序段执行三次的位置
L	表示刀具沿直线运动
C	表示刀具沿圆弧运动
r	表示刀具半径偏置矢量（大小等于半径补偿值，方向由系统确定）
交点	为指两个程序段的编程轨迹被偏移 r 后彼此相交的位置
S 和 E	为编程轨迹的起始点和结束点
○或●	表示刀具中心点
—— ——→	粗实线或带箭头的粗实线表示零件轮廓或编程轨迹
—-—-— —-—-→	双点画线或带箭头的双点画线表示刀具中心轨迹，即偏置轨迹

（3）运动轨迹分析　分三种方式讨论，即启动补偿方式、补偿执行方式和取消补偿方式。每种方式按起刀点位置的不同（以角度 α 不同区分）分三种情况讨论。另外，系统提供了两种形式（A 型或 B 型）的运动轨迹，可由参数 No. 5003#0（SUP）设置，默认设置为 A 型。

1）启动补偿方式。数控程序段满足以下条件即进入启动补偿方式，这一操作控制又叫起刀。

① 程序段中包含有 G41 或 G42。

② 刀具半径补偿号不为 D00，且刀具补偿值不为零。

③ 程序段中有直线移动指令 G00 或 G01，且移动距离不为 0（一般要求大于刀具半径补偿值）。

启动补偿的刀具轨迹如下所述：

① 加工内侧面（$\alpha \geqslant 180°$）的刀具轨迹如图 3-48 所示，这种启动补偿的方式最可靠。

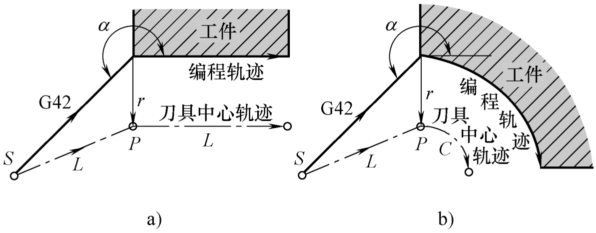
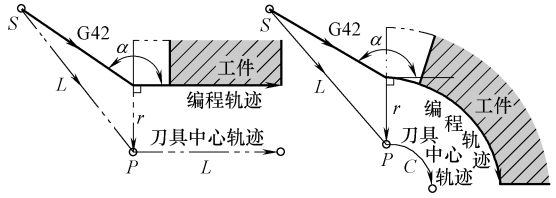


图 3-48　启动补偿（$\alpha \geqslant 180°$）
a）直线-直线　b）直线-圆弧

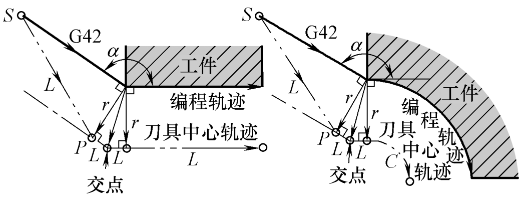
② 加工外侧面（$90° \leqslant \alpha < 180°$）的刀具轨迹分为 A、B 两种形式，如图 3-49、图 3-50 所示。A 型运动迹处理不当可能造成过切现象，建议适当延伸工件轮廓线，B 型运动轨迹可以避免过切。



a) b)

图 3-49 启动补偿（90°≤α<180°，A 型）

a）直线-直线 b）直线-圆弧

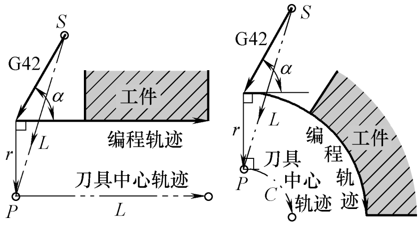


a) b)

图 3-50 启动补偿（90°≤α<180°，B 型）

a）直线-直线 b）直线-圆弧

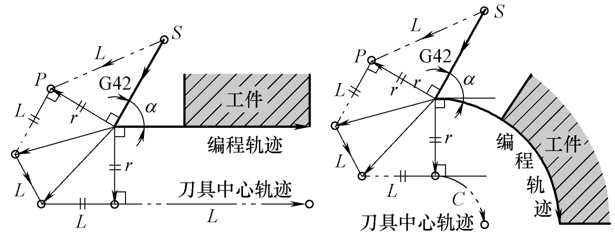
③ 加工外侧面（α<90°）的刀具轨迹分为 A、B 两种形式，如图 3-51、图 3-52 所示。A 型刀具移动轨迹非常容易造成过切，尽量避免采用。B 型刀具移动轨迹可在一定程度上避免过切，但仍然存在过切的可能性，建议适当延伸工件轮廓线，最好的办法是避免这种启动补偿方式。



a) b)

图 3-51 启动补偿（α<90°，A 型）

a）直线-直线 b）直线-圆弧



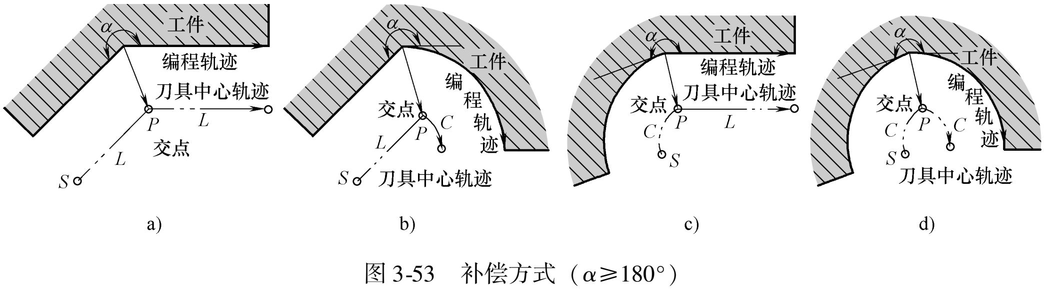
a) b)

图 3-52 启动补偿（α<90°，B 型）

a）直线-直线 b）直线-圆弧

2）补偿执行方式。数控程序启动补偿方式后至取消补偿方式前刀具移动处于补偿执行方式，其刀具运动轨迹如下所述：

① 加工内侧面（α≥180°）的刀具轨迹如图 3-53 所示，系统自动求出两补偿轨迹的交点。



a) b) c) d)

图 3-53 补偿方式（α≥180°）

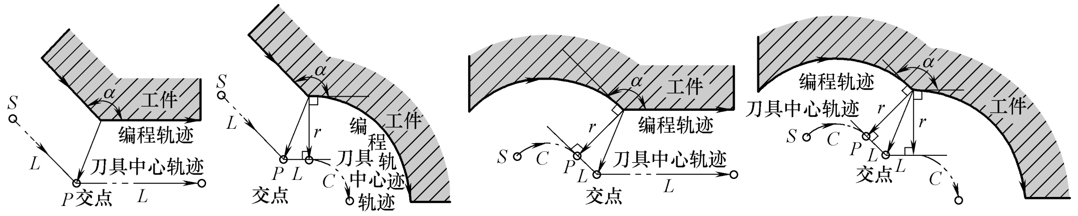
a）直线-直线 b）直线-圆弧 c）圆弧-直线 d）圆弧-圆弧

② 加工外侧面（90°≤α<180°）的刀具轨迹如图 3-54 所示。

③ 加工外侧面（α<90°）的刀具轨迹如图 3-55 所示。

3）取消补偿方式刀具运动分析，数控程序段满足以下条件即进入取消补偿方式。

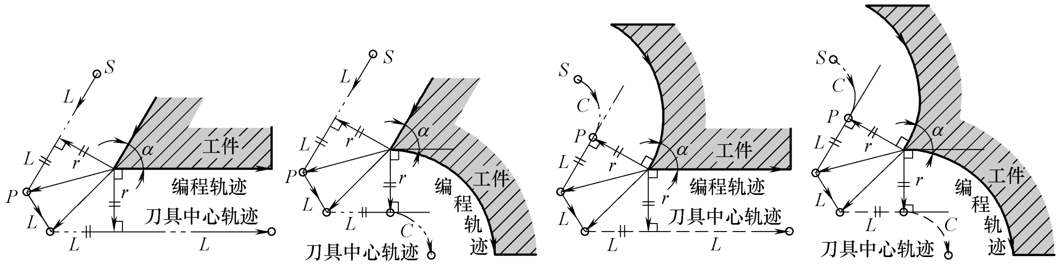
① 程序段中含有 G40 指令。



a)　　b)　　c)　　d)

图 3-54　补偿方式（90°≤α＜180°）

a）直线-直线　b）直线-圆弧　c）圆弧-直线　d）圆弧-圆弧



a)　　b)　　c)　　d)

图 3-55　补偿方式（α＜90°）

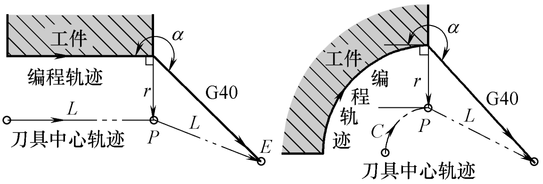
a）直线-直线　b）直线-圆弧　c）圆弧-直线　d）圆弧-圆弧

② 刀具半径补偿补偿号为 D00。

③ 程序段中有直线移动指令 G00 或 G01，且移动距离不为 0（一般要求大于刀具半径补偿值）。

取消补偿时的刀具轨迹如下所述：

① 加工内侧面（α≥180°）的刀具轨迹如图 3-56 所示，这种取消补偿方式最可靠。

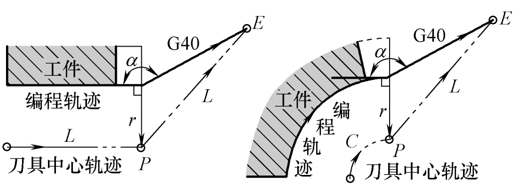


a)　　b)

图 3-56　取消补偿（α≥180°）

a）直线-直线　b）圆弧-直线

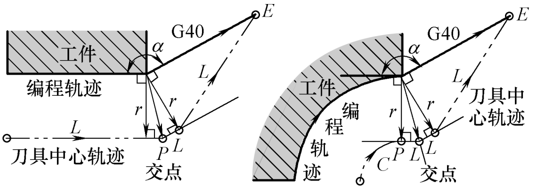
② 加工外侧面（90°≤α＜180°）的刀具轨迹分为 A、B 两种型式，如图 3-57、图 3-58 所示。A 型运动轨迹处理不当可能造成过切现象，建议适当延伸工件轮廓线，B 型运动轨迹可以避免过切。



a)　　b)

图 3-57　取消补偿（90°≤α＜180°，A 型）

a）直线-直线　b）圆弧-直线



a)　　b)

图 3-58　取消补偿（90°≤α＜180°，B 型）

a）直线-直线　b）圆弧-直线

③ 加工外侧面（$\alpha < 90°$）的刀具轨迹也分为 A、B 两种形式，如图 3-59 和图 3-60 所示。A 型刀具移动轨迹非常容易造成过切，尽量避免采用。B 型刀具移动轨迹可在一定程度上避免过切，但仍然存在过切的可能性，建议适当延伸工件轮廓线，最好的办法是避免这种启动补偿方式。

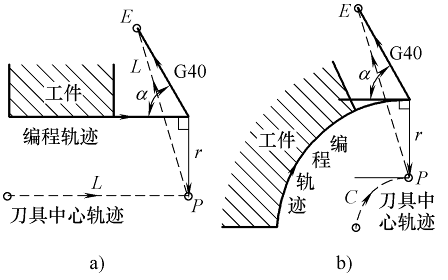


图 3-59　取消补偿（$\alpha < 90°$，A 型）
a）直线-直线　b）圆弧-直线

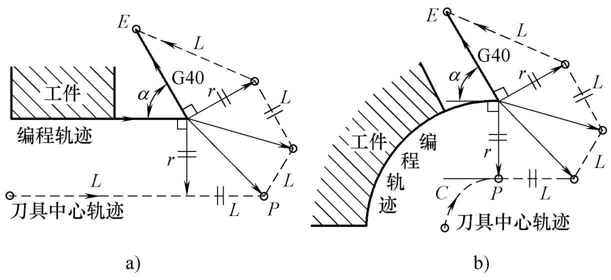


图 3-60　取消补偿（$\alpha < 90°$，B 型）
a）直线-直线　b）圆弧-直线

以上简单讨论了刀具半径补偿时刀具的运动轨迹，具体可参见厂家资料——FANUC 0i MC 操作说明书。

3. 数控系统对刀具半径补偿处理过程的分析

机床通电开机后默认为 G40 方式；按下了 MDI 面板上的复位按键或者执行了 M02、M30 强制结束程序，系统立即进入取消方式；当然执行了取消半径补偿指令 G40 等也进入取消刀具半径补偿方式。此方式下，系统执行一段程序段，同时预读下一个程序段进入缓冲寄存器，但不读入刀具半径补偿缓冲区，即不处理刀具半径补偿功能，因此刀具中心轨迹与编程轨迹重合。

系统执行了刀具半径补偿指令 G41/G42 并读入刀具半径补偿值后，即启动刀具半径补偿功能，并进入刀具半径补偿方式。此时，产生一个偏置矢量 $\boldsymbol{r}$，其大小等于半径补偿值，方向由系统根据编程轨迹自动计算确定（见图 3-48 ~ 图 3-60）。如前述 A 型启动刀具半径补偿程序段，刀心的终点坐标是由一个起始于下一个程序段起点、大小等于刀具半径补偿值、方向垂直于下一个程序段起点的偏置矢量确定的坐标点。数控系统正是在编程轨迹的基础上，依据一定的规则不断地计算偏置矢量，最终确定刀心轨迹实现半径补偿功能。

在启动刀具半径补偿和其后的补偿执行方式中，数控系统执行程序时预读了两个程序段。执行第一个程序段，第二个程序段进入刀具半径补偿缓冲存储器，并对刀具补偿参数（刀具半径等）进行处理，计算出偏置矢量，从而确定刀心轨迹。在单程序段工作方式下，读入两个程序段而执行第一个程序段，然后机床停止。在以后的操作中，提前读入两个程序段，因而数控系统中有正在执行的程序段和其后的两个程序段。若其后的两个程序段出现了无工作平面内移动的程序段（如刀具的 Z 轴移动、辅助功能指令或暂停指令 G04 等），则系统无法计算出正确的偏置矢量，则可能产生过切现象，这种程序在初学者中常常出现。

4. 刀具半径补偿设置画面与应用分析

刀具半径补偿指令执行之前，必须预先在系统中存入刀具半径补偿值，其常见的方法是在 MDI 面板中键盘输入。

（1）补偿存储器与设置画面构成　在数控系统的 MDI 面板上，按下功能键 OFS/ SET ，

按下［偏置］软键，进入刀具偏置的显示画面（FANUC 系统操作画面上的偏置就是通常所说的补偿，本书刀具半径用补偿，刀具长度用偏置），可查阅刀具补偿值的设置，若再按下［(操作)］软键，即可进入偏置参数编辑画面，可看到下部软键的变化，如图 3-61所示，可对刀具补偿值进行编辑（即输入、修改和删除等）。

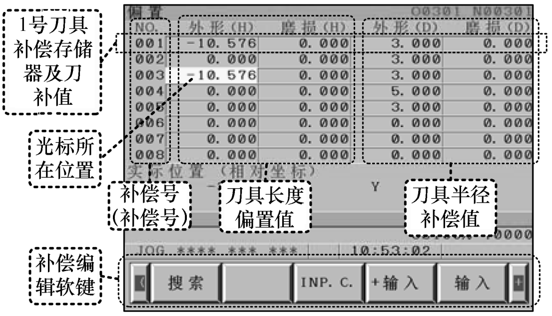


图 3-61　刀具偏置编辑画面

从图 3-61 可见，刀具偏置存储画面分为 5 列，第 1 列为刀具偏置存储器编号，第 2、3 列分别为刀具长度偏置存储器，分为外形（H）与磨损（H）两部分管理。第 4、5 列分别为刀具半径补偿存储器，同样分为外形（D）和磨损（D）两部分。每一行显示某一存储器中的补偿值，用操作面板上的上下翻页键 或 可翻页浏览其他偏置存储器的值。数控系统中设置了一定数量的补偿存储器供用户使用。以 FANUC 0i MC 数控系统为例，它有多达 400 个补偿存储器，完全可满足实际需要。对于刀具半径补偿值设置而言，就是将刀具补偿值存入图 3-61 所示画面中的外形（D）和磨损（D）对应的文本框中。

（2）**刀具半径补偿存储值的设置技巧与禁忌**

1）现代数控系统对于刀具补偿值一般均是分两部分管理，即外形与磨损，前者用于基本设置，后者用于微量调整，实际补偿值为两部分的代数和。

2）刀具半径补偿存储器中存入的是刀具补偿值，不一定完全等于刀具半径，可根据实际需要进行设置。

3）刀具半径补偿值的设置可借用工程设计尺寸的“基本尺寸与公差”的概念，如使用一把 ϕ10mm 的铣刀进行加工，若希望铣完后还留有单面 0.5mm 的精加工余量，则可在外形(D)一栏输入“5.000”，而在磨损(D)一栏输入“0.500”，则实际的刀具补偿值为“5.500”。

4）尽量不要仅用外形（D）一栏进行设置与修改，否则容易造成自己都不知道基本偏置值是多少。

5）刀具补偿值的编辑与修改，尽可能用下部的［+输入］软键，而不要心算后直接用［输入］软键修改。

3.3.2　刀具半径补偿功能应用技巧

刀具半径补偿功能开发的初衷是为了解决刀位点与切削点不重合导致编程困难的问题，但按照以上的原理分析，可以看出其还有其他潜在的功能。

1. 应用刀具半径补偿指令程序示例

以上进行刀具半径补偿原理分析时，谈到初学者由于不理解刀具半径补偿指令执行时预读两个程序段的原理，导致出现如图 3-23 所示的过切错误。以下为错、对程序对比，相关尺寸如图 3-62 所示，读者可细细品味。

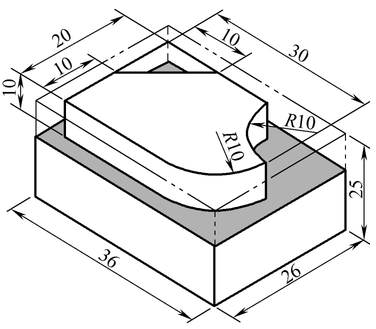


图 3-62　刀具半径补偿指令示例图

```
O3621;(出现过切的程序)
N10 S1000 M03;
N20 G00 G90 G54 X35. Y30. Z50. ;
N30 G42 X25. Y10. F100 D01;
N40 G43 Z5. H01;
N50 G01 Z-10. ;
N60 X-5. ;
N70 G03 X-15. Y0 R10. ;
N80 G02 X-5. Y-10. R10.
N90 G01 X5. ;
N100 X15. Y0;
N110 Y20. ;
N120 G49 G00 Z50. ;
N130 G40 X35. Y30. ;
N140 M30;
```

```
O3622;(正确的加工程序)
N10 S1000 M03;
N20 G00 G90 G54 X35. Y30. Z50. ;
N30 G43 Z5. H01;
N40 G01 Z-10. ;
N50 G42 G01 X25. Y10. F100 D01;
N60 X-5. ;
N70 G03 X-15. Y0 R10. ;
N80 G02 X-5. Y-10. R10.
N90 G01 X5. ;
N100 X15. Y0;
N110 Y20. ;
N120 G40 G00 X35. Y30. ;
N130 G49 G00 Z50. ;
N140 M30;
```

程序分析：

1）左侧的数控程序（O3621）在执行 N30 程序段启动刀具半径右补偿时，预读的是两个 *Z* 轴下刀的程序段 N40 和 N50，系统无法计算出偏置矢量，因此，N30 程序段实际上未建立起刀具半径补偿，接着执行的下刀程序段为非工作平面（*XY* 平面）的刀具移动，也无法建立刀具补偿，因此程序段 N50 执行完后刀具仍未建立起刀具补偿。由于刀具补偿指令为模态指令，接着的程序段 N60 开始启动刀具半径补偿，刀具从点 2 移动至点 3 处偏置矢量确定的位置，这个过程产生了过切。具体可参见图 3-23。

右侧的数控程序（O3622）是先下刀（N30 和 N40 程序段），然后由程序段 N50 启动刀具半径补偿，其后的程序段 N60 为 *XY* 平面内的移动，因此可以建立起刀具半径补偿，且不会出现过切现象。

2）注意程序中的启动刀具半径补偿指令 G42 与取消刀具半径补偿指令 G40 成对使用，确保刀具轨迹的结束点 *E* 与起始点 *S* 重合，这种编程习惯对 G92 指令设定工件坐标系的数控程序特别重要。

3）程序采用直线切线切入/切出，工件轮廓上不会留下接痕。

2. 用一个数控加工程序实现粗、精加工

刀具半径补偿功能编程是按工件轮廓线编程，刀心轨迹是由偏置矢量确定的，通过控制刀具半径补偿值的大小，可以控制刀心轨迹与工件轮廓的偏置距离。基于这个原理，可用一个数控程序实现二维轮廓粗、精加工。

以图 3-62 所示零件的数控加工程序 O3622 为例，假设精加工余量取 0.5mm，刀具直径为 ϕ10mm，则粗、精加工过程为：

1）在刀具半径补偿存储器外形 D01 栏存入粗铣补偿值 5.500mm，同时将磨损 D01 栏清零，调用程序进行加工。

2）测量某一 *XY* 平面中的尺寸，如图中的轮廓宽度 20mm，假设为 21.12mm。

3）精确计算精铣加工余量，此处为（21.12－20.0）mm/2＝0.56mm，并将－0.56 存入磨损 D01 存储器中，然后调用程序加工即可获得所需的轮廓尺寸。

编程技巧与禁忌：

1）这种方法无法粗、精铣分别用逆、顺铣加工，但好在数控机床的传动丝杠为预紧后的滚珠丝杠，无间隙，即使切削宽度较大时也不会出现跳跃打刀现象。因此，粗、精铣加工方式的选择可考虑轮廓面加工质量、材料性能等因素，如希望加工表面质量较好时，精铣拟采用顺铣加工，则该程序应该为顺时针走刀方向、G41 指令偏置加工等。

2）对于有尺寸公差要求的工件，编程时建议将所有尺寸换算为对称分布公差带的尺寸，按公差中间尺寸编程，且最终检验测量的尺寸以公差最小的尺寸为准即可。

3）基于此加工原理，可改造水平分层粗铣 + 精铣的加工方法。将刀具半径补偿值设置为约 0.75D（即粗铣行距设置为刀具直径的 75% 左右），即可实现水平分层粗铣加工。

4）刀具半径补偿值的设置依各人习惯有所不同，一般是在 D01 存储器的外形（D）栏设置为刀具半径，并固定不动，仅通过改变磨损（D）栏实现最终刀补值的设置。

有兴趣的读者可思考图 3-44 圆柱铣削加工程序 O3440 是如何控制直径尺寸的。

3. 凸、凹配合件共用一个数控加工程序

前面分析谈到，刀具半径左/右补偿指令 G41/G42 是基于刀具半径补偿值为正值条件下定义的，若补偿值为负值，则左/右补偿对调。正是基于这样一个原理，我们可以用一个数控加工程序通过改变补偿值的正、负值实现相互配合凸、凹配合件共用一个数控加工程序的目标。

图 3-63 所示为一对凸、凹配合件，拟采用一个数控程序完成加工。假设毛坯已完成六面加工，型腔轮廓加工分粗、精加工两步完成，精加工取单面余量 0.5mm，选择 ϕ12mm 圆柱立铣刀，采用直线切线引入、引出，引入、引出长度为 8mm。

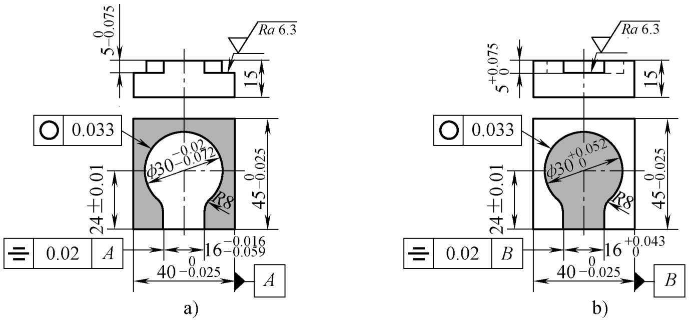


图 3-63　凸、凹配合件示意图
a）凸件　b）凹件

加工参考程序如下，程序注释以凸件加工为参照，读者自行分析凹件程序注释。

O3630；	程序名
N10 G90 G55 G00 X0 Y54. Z100；	建立工件坐标系 G55，快速定位至起刀点 S
N20 S400 M03；	主轴正转，转速为 400r/min
N30 Z-5.；	Z 轴快速下刀至 A 点
N40 G42 G00 X-8. Y32. D01 M08；	起刀至 B 点，建立刀具半径右补偿，开切削液
N50 G01 Y16.523 F200；	粗铣直线至 C 点，进给速度 200mm/min
N60 G02 X-10.435 Y10.776 R8.；	粗铣 R8 圆弧至 D 点
N70 G03 X10.435 Y10.776 R-15.；	粗铣 ϕ30 圆弧至 E 点
N80 G02 X8. Y16.523 R8.；	粗铣 R8 圆弧至 F 点

N90 G01 Y32.;	粗铣直线至 *G* 点
N100 G40 G00 X0 Y54. M09;	退刀至 *A* 点,取消刀具半径补偿,关切削液
N110 M05;	主轴停转
N120 M00;(或 M01)	程序(或选择)暂停,测量粗铣尺寸,调整 D02 中补偿值
N130 S1000 M03;	主轴正转,提高主轴转速至 1000r/min
N140 G41 G00 X8. Y32. D02 M08;	起刀至 *G* 点,建立刀具半径左补偿,开切削液
N150 G01 Y16.523 F100;	精铣直线至 *F* 点,进给速度 100mm/min
N160 G03 X10.435 Y10.776 R8.;	精铣 *R*8 圆弧至 *E* 点
N170 G02 X-10.435 Y10.776 R-15.;	精铣 ϕ30 圆弧至 *D* 点
N180 G03 X-8. Y16.523 R8;	精铣 *R*8 圆弧至 *C* 点
N190 G01 Y32.;	精铣直线至 *B* 点
N200 G40 G00 X0 Y54.;	退刀至 *A* 点,取消刀具半径补偿
/N210 G00 Y14.;	快速进给至 *h* 点(凹件加工使用)
/N220 G01 Y0.;	直线铣削至 *i* 点,加工 ϕ5mm 凸台(凹件加工使用)
/N230 Z5.;	提刀至 *j* 点(凹件加工使用)
N240 G00 X0 Y54 Z100. M09;	快速退回至结束点 *E*(与起刀点 *S* 重合),关切削液
N250 M30;	程序结束,返回程序头

图 3-64 所示为加工轨迹示意图。注意，铣内腔时由于中心会留下一个 ϕ5mm 左右的圆柱，因此特设计了 N210 ~ N230 三个程序段铣削，铣凸件时需跳过这三段程序。

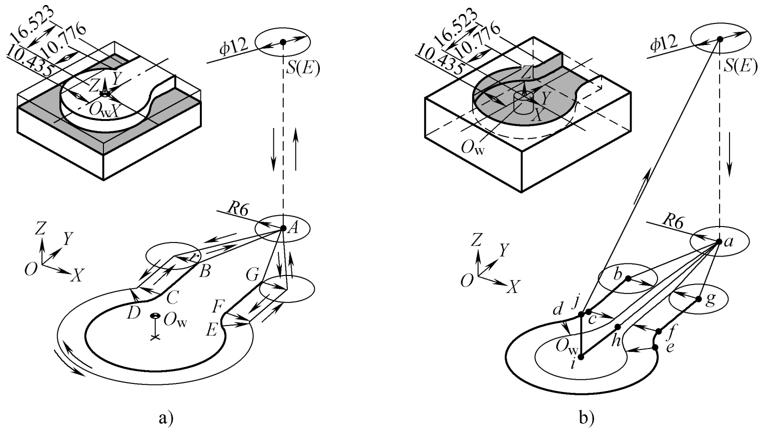


图 3-64　凸、凹配合件刀具轨迹示意图

a）凸件　b）凹件

程序分析：

1）该程序将粗、精铣轮廓合并在一个程序中，操作方便，适合于有一定批量零件的加工。不足之处是无法同时满足粗铣用逆铣、精铣用顺铣的原则。

2）该程序加工凸件时，按下机床操作面板上的 程序段跳跃 按键，跳过程序段 N210 ~ N230，粗铣为逆铣，精铣为顺铣。刀具半径补偿设置为：D01 = 6.5，D02 ≈ 6（具体以测量计算为准）。加工凹件时，释放 程序段跳跃 按键，执行程序段 N210 ~ N230，粗铣为顺铣，精铣为逆铣。刀具半径补偿设置为：D01 = -6.5，D02 ≈ -6（具体以测量计算为准）。

3）加工凸件时两顶角会留下的一点余料，可手动操作机床切除。

4）N120 程序段为程序暂停，用于测量粗加工后的结果，确定精加工时的刀具补偿值。如果是批量加工，可将指令改为选择停 M01，加工一定数量的零件后再抽检。

以下将程序拆分为两个程序供参考，分别为顺时针与逆时针方向加工，再利用正、负补偿值，实现左、右补偿控制。参考程序如下：

```
O3631;(顺时针加工路径)
N10 G90 G54 G00 X0 Y54. Z100;
N20 S400 M03;
N30 Z-5. ;
N40 G42 G00 X-8. Y32. D01 M08;
N50 G01 Y16.523 F200;
N60 G02 X-10.435 Y10.776 R8. ;
N70 G03 X10.435 R-15. ;
N80 G02 X8. Y16.523 R8. ;
N90 G01 Y32. ;
N100 G40 G00 X0 Y54. M09;
N110 X0 Y54 Z100. M09;
N120 M30;
```

```
O3632;(逆时针加工路径)
N10 G90 G54 G00 X0 Y54. Z100;
N20 S1000 M03;
N25 Z-5. ;
N30 G41 G00 X8. Y32. D02 M08;
N40 G01 Y16.523 F100;
N50 G03 X10.435 Y10.776 R8. ;
N60 G02 X-10.435 R-15. ;
N70 G03 X-8. Y16.523 R8;
N80 G01 Y32. ;
N90 G40 G00 X0 Y54. ;
N100 X0 Y54 Z100. M09;
N110 M30;
```

程序分析：

1）以上两程序分开编写，可方便地对凸、凹件进行粗、精铣和逆、顺铣方式的控制。不足之处是粗、精铣程序要分别调用，批量生产时工作效率略低，适合于单件、小批量生产。

2）加工凸件时，按粗铣采用逆铣、精铣采用顺铣的原则，其加工方法为：设置 D01 = 6.5，调用程序 O3641 粗铣凸件轮廓；然后测量尺寸，精确计算精铣程序的刀补值，并输入 D02 存储器中，调用程序 O3642 精铣凸件轮廓至尺寸。

3）加工凹件时，仍按粗铣采用逆铣、精铣采用顺铣的原则，其加工方法为：设置 D02 = -6.5，调用程序 O3642 粗铣凹件轮廓；然后测量尺寸，精确计算精铣程序的刀补值，并输入 D01 存储器中，调用程序 O3641 精铣凹件轮廓至尺寸。

4）凸、凹件加工时留下的剩余材料在工件拆下前用手动操作机床切除。

3.3.3　补偿刀具磨损以及实现轮廓尺寸的精确控制

刀具半径补偿功能既然可以实现刀具轨迹偏离编程轨迹的控制，当刀具直径磨损或出现制造误差时，可以方便地进行补偿；既然可以方便地调整刀心轨迹的偏置距离，当然可以用于精确控制尺寸。但是，如何更好地进行调整与控制，还是有一些规律可循的。实际上，观察图 3-61 所示刀具偏置画面，注意到其将补偿值分为“外形（D）”与“磨损（D）”两部分管理就可以看出数控系统设计时就已经将这个问题考虑进来了，本节实际上是讨论“磨损（D）”补偿存储器的应用。

1. 刀具磨损补偿应用技巧

假设系统已进入图 3-61 所示的偏置画面，其后的操作方法如下：

1）按下 MDI 面板上相应的光标移动键将光标定位到程序中指定的补偿存储器外形

（D）的文本框位置处。

2）在输入缓冲区键入刀具半径值（基本的刀具半径补偿值），然后按下［输入］软键，完成基本补偿值的设置。按同样的方法，在磨损（D）文本框中预设一个正的补偿值（如0.500）。

3）调用数控加工程序，进行自动加工，然后测量某一横向外形尺寸，与图样上相应的设计尺寸比较计算。由于预设了一个正的补偿值，加工尺寸必然偏大，计算出单面偏大值（假设为0.45mm）

4）在输入缓冲区键入负的偏大值（以上述假设，则键入－0.45），按下［＋输入］软键，则文本框由原来的0.500变化为0.050。这实际上说明刀具直径的制造误差为＋0.1mm。

5）加工一段时间后，测量前述同一尺寸，其尺寸必然偏大。若尺寸偏大且超差，则需进行刀具磨损补偿。假设希望单面尺寸减小0.013mm，则在输入缓冲区键入－0.013，按［＋输入］软键，则这个值与原来的存储值进行代数和计算，例如上述设置值为0.050，则与－0.013的代数和为0.037。这说明当前刀具的实际直径尺寸误差为＋0.074mm，直径值磨损了0.026mm。

补偿值及其补偿存储器的应用技巧与禁忌

1）外形（D）存储器中存入的是刀具的基本尺寸，磨损（D）存储器中存入的是偏差值。

2）尽量不要改变外形（D）补偿值，否则使用一段时间后可能自己都不记得初期的设置值是多少。

3）注意［输入］和［＋输入］软键的功能。前者是将缓冲区的键入值直接输入光标所在位置的缓冲器中并替换原来的值，而后者是将缓冲区中的键入值与光标所在位置的当前值求代数和。

4）尽可能使用［＋输入］软键调整补偿值，而不要心算后用［输入］软键直接改变补偿值。这是一个良好的习惯。

2. 轮廓尺寸精确控制的应用技巧与禁忌

要对轮廓尺寸进行精确控制，具体**应用技巧与禁忌**如下：

1）首先，阅读图样，明确编程时用到的尺寸及其公差要求，并查找到公差最小且便于测量的某一个尺寸。

2）将所有尺寸换算称为公差对称分布的尺寸形式（XXX.XXX±0.XXX），注意所有尺寸与公差计算到小数点后面三位。

3）按换算后的基本尺寸进行数控编程。

4）按上述刀具磨损补偿应用技巧所述的第1）～4）步进行首件试切，其中测量的尺寸必须是第1）步查到的最小公差的尺寸。该尺寸如果不超差，则其他尺寸必然合格。

使用一段时间后刀具由于磨损产生的尺寸超差，按以上刀具磨损修改刀具半径补偿值的方法处理，即可保证尺寸误差控制在公差范围内，实现轮廓尺寸的精确控制。

3.3.4 刀具长度偏置功能与动作分析

刀具长度偏置功能是数控铣床或加工中心补偿功能的一个组成部分。3.3.3节讨论的刀具半径补偿功能解决的是刀具径向方向尺寸补偿与偏置问题，本节刀具长度偏置功能需要解决的是刀具轴向方向的补偿与偏置问题。

1. 刀具长度偏置原理与指令

（1）问题的提出　数控铣床特别是加工中心的加工过程中，不可避免地会遇到多把刀具加工的问题，这些刀具长度不可能完全相等。即使是一把刀具加工，更换新刀具也会遇到刀具长度不相等的问题。另外，刀具使用过程中长度方向的磨损也是不可避免的。对于这些问题，如果不进行任何处理，其加工结果必然是工件高度方向的欠切或过切。

以图 3-65 所示的两把刀具加工为例。若首先以刀具 A 对刀加工，当换为刀具 B 加工时，由于其长度比刀具 A 短，若不作任何处理，其结果是高度方向欠切。相反，若刀具 B 比刀具 A 长，则结果是高度方向的过切。

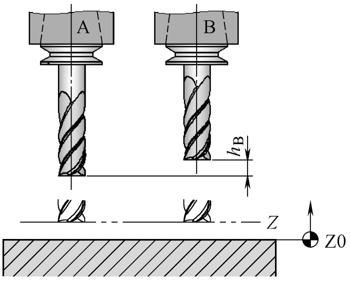


图 3-65　刀具长度偏置原理

基于以上问题，现代数控铣床一般都具有刀具长度偏置功能，以补偿由于刀具长度方向的不等造成的欠切与过切问题。以图 3-65 所示问题为例，若换上刀具 B 后，在原程序执行时的 Z 轴坐标均向下叠加一个 h_B 值，即可解决刀具的欠切问题。

（2）刀具长度偏置指令 G43/G44/G49　为解决刀具长度不等的问题，FANUC 0i 铣削系统设计了三个指令 G43/G44/G49。数控系统依据指令 G43/G44 可对后续程序中的 Z 坐标叠加一个长度偏置值，改变高度方向的实际 Z 坐标位置，补偿刀具长度不等的问题。

立式数控铣床刀具长度偏置指令的标准格式为：

$\begin{Bmatrix} G43 \\ G44 \end{Bmatrix}$Z_H_;　　　　启动刀具长度$\begin{Bmatrix} 正 \\ 负 \end{Bmatrix}$方向偏置

……　　　　　　　　长度偏置执行方式

G49;　　　　　　　　取消刀具长度偏置，或用 H00 取消。

其中，G43/ G44 是启动刀具长度正/负方向偏置指令。

H_是刀具长度偏置存储器编号，又称偏置号，由地址符 H 加 1 ~ 3 位非零数字组成。

G49 是取消刀具长度偏置指令。

（3）编程技巧与禁忌

1）刀具长度偏置有三种偏置方法，对于立式铣床默认设置为长度偏置 A，这种偏置方式仅对 Z 轴偏置。

2）刀具长度偏置指令 G43/G44/G49 是同组的模态指令，可以相互注销。系统开机默认为 G49。

3）刀具长度正/负方向偏置指令 G43/G44 是基于长度偏置存储器存入的偏置值为正值而定义的，实际中长度偏置常用一个指令 G43 实现长度正/负方向偏置，详见下面的动作分析。

4）刀具长度偏置号可以在程序中改变（即偏置值可以程序中改变），且这种改变不与原偏置值叠加。

5）指令中 H 代码指定的是刀具长度偏置存储器的地址（即偏置号），偏置存储器中的数值才是刀具长度偏置值，H 代码为续效字，相当于模态值。

6）指定指令 G49 即进入刀具长度偏置取消方式。H00 是系统保留的偏置号，其刀具补偿值永远为 0，指定偏置号 H00 与执行 G49 指令效果相同。另外，系统开机默认为 G49 方

式，执行指令 M30 或 M02 以及按下 MDI 面板上的 RESET 键也进入 G49 方式。

7）刀具长度偏置值必须在程序执行之前，通过 MDI 面板操作输入。另外系统提供的编程输入指令 G10 可通过程序输入偏置值。

8）G43/G44 与 G49 一般成对使用，即程序结束前一般使用 G49 取消刀具长度偏置，使刀具返回起刀点高度，这是一个良好的编程习惯，甚至可避免可能的 *Z* 轴超程。

2. 刀具长度偏置动作分析

（1）刀具长度正/负方向偏置指令 G43/G44 动作分析　图 3-66 为刀具长度偏置示意图。G43 指令为刀具长度正向偏置指令，当执行 G43 Z_H××时，刀具到达的实际 *Z* 轴位置是将指令指定的 *Z* 轴坐标与偏置存储器中的补偿值相加，即图中的位置 *H*。同理，G44 指令为刀具长度负向偏置指令，当执行 G44 Z_H××时，刀具到达的实际 *Z* 轴位置是将指令指定的 *Z* 轴坐标与偏置存储器中的补偿值相减，即图中的位置 *L*。G49 指令为刀具长度偏置取消指令，此时刀具到达的实际位置即指令中指定的 *Z* 轴坐标位置，即图中的位置 *P*，显然，其相当于 G43/G44 指令中指定长度偏置号 H00 的结果，因为 H00≡0。

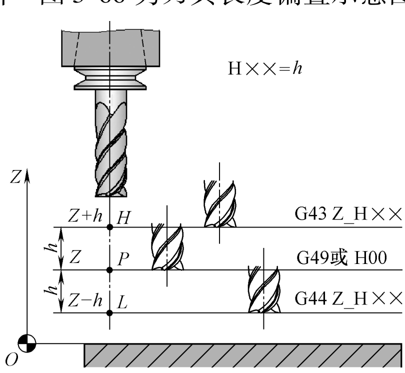


图 3-66　刀具长度偏置示意图

（2）用一个指令 G43 实现长度正/负方向偏置分析　上面讨论刀具长度正/负方向偏置时是假设刀具长度偏置存储器存入的是正的偏置值，现在假设在刀具偏置存储器 H××存入的为负值（假设为 $-h$），当执行正向偏置指令 G43 Z_ H××时，其实际到达的位置为“$Z+(-h)=Z-h$”，其最终到达的 *Z* 轴位置为 *L*，实际结果相当于刀具长度负向偏置。基于这个原理，实际中仅用一个长度偏置指令 G43，通过刀具长度偏置存储器中存入正/负偏置值，实现刀具长度的正/负方向偏置。其指令格式如下：

G43 Z_H××；

……

G49；

指令中，当 H××中存入正值时是正向偏置，而存入负值时便是负向偏置。这种刀具长度偏置在实际生产中广泛采用。

（3）长度偏置指令中未指定尺寸字 Z_的动作分析　此时，刀具以当前位置进行长度偏置。以下两个指令是等价的，读者可细细体会。

$$\left\{\begin{matrix}\text{G43}\\ \text{G44}\end{matrix}\right\}\text{H_} \quad \Leftrightarrow \quad \left\{\begin{matrix}\text{G43}\\ \text{G44}\end{matrix}\right\}\text{G91 Z 0H_}$$

3. 刀具长度偏置功能应用分析

长度偏置功能的应用可以归纳为以下几点：

1）可用于多把刀具或一把刀具加工更换新刀具后长度不等的补偿，这是刀具长度偏置功能的基本用法，必须掌握。

2）可用于 *Z* 轴方向加工尺寸的微调与控制。

3）可用一把刀具调用不同的长度偏置值进行分层加工。

3.3.5　刀具长度偏置指令的应用分析

刀具长度偏置功能的应用需要解决几个问题：首先，长度偏置指令 G43 与取消指令 G49 在程序中的使用规律；其次，刀具长度偏置值如何确定与应用等。

1. 仅用 G43 指令实现长度偏置的应用

刀具长度偏置指令实际使用中一般仅用一个 G43 指令，且与取消长度偏置指令 G49 成对使用。图 3-67 所示为长度偏置应用示例。

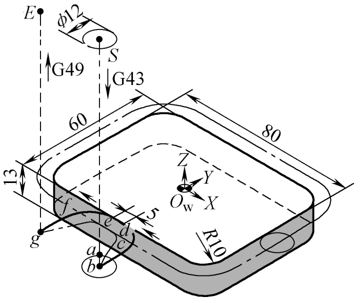


图 3-67　刀具长度偏置应用示例

该示例要求程序能够实现粗、精铣轮廓，编程思路是：以工件上表面轮廓线为对象，编写一个具有刀具半径补偿与长度偏置的数控程序，具体程序如下。

程序加工操作思路（假设刀具直径为 ϕ12mm，刀具半径补偿存储器编号为 D01，长度偏置存储器为 H01）：粗铣轮廓时，设置刀具补偿值为 D01 = 6.500，刀具长度偏置 H01 分别设置为 − 2.000、− 4.000、− 6.000、− 8.000、− 10.000、− 12.000、− 14.000，加工 7 次，然后保持 H01 = − 14.000 不变，测量外形尺寸，精确计算精铣轮廓的刀具半径补偿值（D01 ≈ 6.000），再次精铣轮廓，完成加工。

O3670;	程序名
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;	系统初始化
N20 G00 G90 G55 X12. Y-54. Z100. ;	G54 建立工件坐标系，快速定位至起刀点 *S*
N30 S1000 M03;	主轴正转，转速为 1000r/min
N40 G43 Z5. H01;	快速下刀至 *a* 点，启动刀具长度偏置
N50 G01 Z0. F100. ;	进给下刀至 *b* 点
N60 G41 Y-42. F200. D01;	直线切削至 *c* 点，启动刀具半径左补偿
N70 G03 X0. Y-30. R12. ;	圆弧切线切入至 *d* 点
N80 G01 X-30. ;	从 *d* 点开始顺时针方向切削轮廓
N90 G02 X-40. Y-20. R10. ;	
N100 G01 Y20. ;	
N110 G02 X-30. Y30. R10. ;	
N120 G01 X30. ;	
N130 G02 X40. Y20. R10. ;	
N140 G01 Y-20. ;	
N150 G02 X30. Y-30. R10. ;	
N160 G01 X-5. ;	切削至 *e* 点，搭接量 5mm，结束轮廓切削
N170 G03 X-17. Y-42. R12. ;	圆弧切线切切出至 *f* 点
N180 G40 G01 Y-54. ;	直线切削至 *g* 点，取消刀具半径补偿
N190 G49 G0 Z100. ;	快速提刀至结束点 *E*，取消刀具长度偏置
N200 M30;	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：

1）利用刀具长度偏置值的不断变化，实现垂直分层粗铣，这种设置可根据实际情况方便地调整背吃刀量。

2）利用刀具半径补偿值的设置实现粗、精铣轮廓加工。

3）程序采用圆弧切线切入/切出，并设置有 5mm 的搭接量，尽量减少接痕，提高加工质量。

4）用一个简单的轮廓加工程序，实现垂直方向的分层粗铣，并实现了水平方向的精铣加工，该编程加工思想可移植至其他形式的轮廓加工。

5）由于粗、精铣加工控制均是靠调整刀具补偿值实现，因此加工效率稍低，适合单件小批量生产。

6）程序采用 G54 指令建立工件坐标系，故结束点 E 与起刀点 S 不重合不会影响程序的多次执行，特别是测量尺寸时可能要将刀具移至一定的安全距离。

刀具长度偏置编程技巧分析：

1）程序仅用刀具长度正向偏置指令 G43，通过设置负的长度偏置值，实现刀具长度的负向补偿。

2）启动刀具长度偏置必须在刀具下刀至工件上表面适当距离处完成，取消刀具长度偏置安排在刀具返回程序结束点程序段，启动刀具长度偏置与取消刀具长度偏置成对使用。

2. 刀具长度的概念与测量方法

刀具长度测量是刀具长度偏置功能的基础。刀具长度偏置功能中用到的刀具长度是刀具的装刀长度，不等于刀具的物理长度。

（1）刀具长度的概念　刀具长度指刀具偏置指令中用到的长度。要讨论这个问题，先来看一下刀具是如何安装在机床主轴上的。图 3-68 所示为弹性夹头装夹直柄刀的示例。圆柱立铣刀通过相应规格的弹性夹头装夹在 7∶24 的刀柄上，刀柄又通过拉钉（图中未示出）被拉紧在具有 7∶24 锥孔的主轴内。刀具长度偏置指令中用到的刀具长度指的是刀具安装在机床主轴上的长度，即图 3-68a 中的 $h_1 \sim h_3$。注意，不得用刀具的物理长度作为刀具长度偏置值，因为各种刀具装入刀柄内的深度具有不确定性。

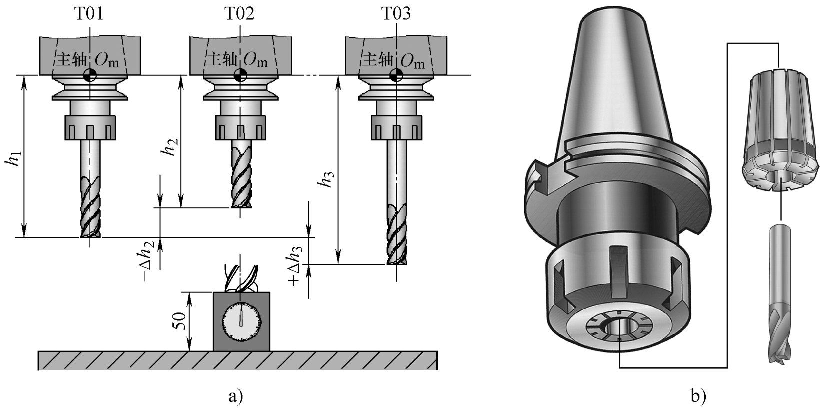


图 3-68　刀具装夹原理

a）机床上安装示例　b）刀具装夹示例

刀具长度有绝对长度与相对长度两种。绝对长度是刀具刀位点至机床主轴端面的距离，也是刀具预调仪上方便测得的刀具长度。相对长度是以基准刀刀位点为基准，其他刀具刀位点与基准刀刀位点之间的长度差。基准刀是用于对刀确定工件坐标系的刀具，又称标准刀，

而刀位点一般取在刀具端面。相对长度不仅可用刀具预调仪测量，还可以借助于机床的位置坐标显示进行测量。

（2）长度偏置的基准点　它是执行刀具长度偏置指令的 Z 轴基准，可以是机床主轴端面，也可以是基准刀的刀位点。当机床返回坐标参考点后它往往是刀具的最高位置。主轴端面还常常作为机床参考点。

（3）刀具长度的测量方法　刀具长度的测量方法有两种——机上测量与机外测量。

机上测量是指在机床上利用数控机床的 Z 轴坐标显示值测量刀具长度的方法，更多的是测量刀具的相对长度，如图 3-68 中的 Δh_2 或 Δh_3。机上测量可用试切法，也可用高度对刀器。图 3-68a 所示为用量表式高度对刀器测量相对长度，每把刀具与高度测量器接触即可通过机床的 Z 轴位置坐标测得长度差。图中，假设 T01 号刀为基准刀，则 T02 号刀比 T01 号刀短 Δh_2，测量的结果是一个负的长度差，而 T03 号刀则是一个正的长度差。这个正、负号同时输入刀具偏置存储器中，则只需一个 G43 指令即可实现刀具长度的正向和负向补偿。

所谓机外测量是指在机床之外应用刀具预调仪等测量的方法。刀具预调仪是一种功能全面的刀具测量装置，可测量刀具的装夹长度、刀具直径、刀尖圆弧半径、刀尖角度、刀尖破损等，甚至可以将测量的数据传输至数控机床中。图 3-69 为某型号刀具预调仪外观图。刀具预调仪可测量刀具的绝对长度与相对长度。

图 3-69　刀具预调仪外观图

3. 刀具长度偏置指令编程与应用技巧

刀具长度偏置指令的编程应用与刀具长度测量方法有紧密的联系，其应用方法主要有以下三种：

1）标准刀（又称基准刀）长度偏置法；

2）机外刀具长度测量偏置法；

3）机上刀具长度测量偏置法。

（1）标准刀长度偏置法应用技巧　标准刀又称基准刀，是建立工件坐标系时对刀的刀具，也是其他刀具测量相对长度的基准刀具。标准刀长度偏置法中用到的是刀具相对长度，可以基于刀具预调仪测量计算，但更多的是在机床上用试切法或高度对刀器等直接测量。数控系统直接提供了测量与输入刀具相对长度的功能，如图 3-61 中的［INP. C.］软键。

以图 3-70 为例，假设 T01 号刀为标准刀，以此刀具刀位点为基准对刀确定工件坐标系，工件坐标系采用 G54 设定并选择，工件坐标系存储器的 Z 轴偏移值为标准刀刀位点至工件坐标系 Z 轴零点之间的有向距离。将 T01 号刀具调用的刀具长度偏置存储器的偏置值置零，其他非标准刀长度偏置存储器中存入的偏置值为相对于标准刀具的长度差 Δh（即相对长度）。当非标准刀比标准刀短时为负偏置值，反之则为正偏置值。标准刀长度偏置法中的基准点取在刀位点上。标准刀长度偏置法数控程序中只需一个刀具长度偏置指令 G43 即可满足使用要求，如图 3-67 对应的加工程序 O3670。

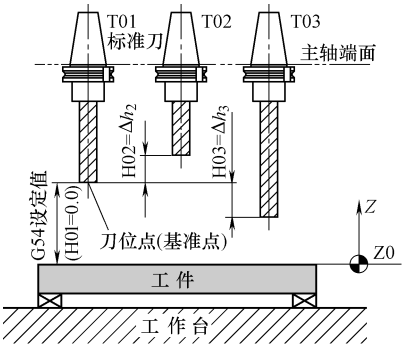


图 3-70　标准刀长度偏置法

使用标准刀长度偏置法进行刀具长度偏置时，其加工程序中标准刀加工的部分不必进行刀具长度偏置，但

长度偏置指令及其存储器编号仍然保留，实际中将其“外形（H）”项偏置值设置为0，“磨损（H）”项留作刀具磨损后的偏置或高度加工尺寸的微调。

标准刀长度偏置法的程序与对刀均较为简单，故应用广泛。不足之处是长度对刀要占用机床的工作时间。

（2）机外长度测量偏置法应用技巧　机外刀具长度测量偏置法是指采用刀具预调仪等专用刀具长度测量装置在数控机床之外测量刀具的绝对长度，并以此为偏置值进行刀具的长度偏置。

以图3-71为例，工件坐标系采用G54设定并选择，工件坐标系存储器的 Z 轴偏移值为主轴端面至工件坐标系原点的垂直距离。刀具偏置存储器中的偏置值是每把刀具的机外测量长度（正值输入），程序中用一个指令G43进行刀具长度偏置。

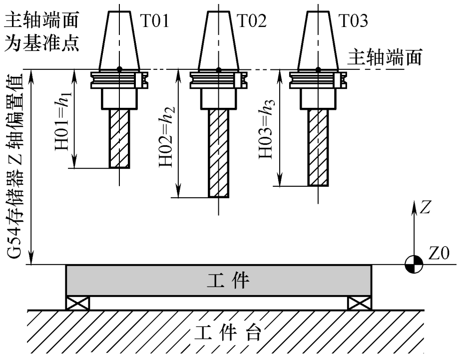


图3-71　机外刀具长度测量偏置原理

以下为一个具有刀具长度偏置功能的数控铣床加工程序框架，读者可仔细体会其长度偏置指令的作用。

O3710;	程序名称
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;	程序初始化,手工装好1号刀
N20 G90 G55 G00 X-100. Y-60. ;	选择工件坐标系,XY平面快速移动至换刀点
N30 S300 M03;	主轴正转,转速为300r/min
N40 G43 Z10. H01;	1号刀具长度正补偿,快速移动至工件上表面10mm处
N50 ……	(1号刀具加工部分略)
N170 G00 X-100. Y-60. Z100. ;	快速退回至换刀点
N180 M00;	程序暂停,手工换2号刀
N200 S350 M03;	调整主轴转速
N210 G43 Z10. H02;	2号刀具长度正补偿,快速移动至工件上表面10mm处
N220 ……	(2号刀具加工部分略)
N340 G0 X-100. Y-60. Z100. ;	快速退回至换刀点
N350 M00;	程序暂停,手工换3号刀
N360 S400 M03;	调整主轴转速
N370 G43 Z10. H03;	3号刀具长度正补偿,快速移动至工件上表面10mm处
N400 ……	(3号刀具加工部分略)
N510 G91 G49 G28 Z0. ;	取消刀具长度补偿,Z轴快速退刀至Z轴参考点
N520 G28 X0. Y0. ;	快速退回至参考点
N530 M30;	程序结束

机外刀具长度测量偏置法进行刀具长度偏置的优点是刀具长度在机床外进行，可提高机床的使用效率。其不足之处表现为：一是刀具预调仪价格较高；二是必须确保加工程序中 Z 轴的移动距离大于刀具的补偿值，否则可能造成 Z 轴超程报警；三是程序执行时若未有效地执行刀具长度偏置可能造成刀具与工件的碰撞事故。

（3）机上刀具长度测量偏置法应用技巧　机上刀具长度测量偏置法是在机床上测量刀

具长度的另一种应用方法。它克服了需要对刀仪测量刀具长度的不足，其测量的不是刀具装夹长度，而是刀具刀位点和工件坐标系 Z 轴零点之间的距离。

图 3-72 所示为其应用原理。假设工件坐标系仍采用 G54 设定并选择，工件坐标系存储器的 Z 轴偏移值设置为零，长度偏置存储器中存储的是图 3-72 所示的 $H_1 \sim H_3$ 值，注意到这个值在机上测量时是一个负的补偿值。

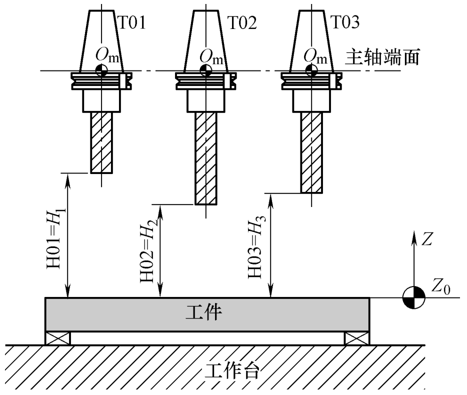


图 3-72　机上刀具长度测量偏置原理

阅读以下程序段体会 T01 号刀具刀位点实际到达的位置为工件坐标系零点。

G90 G54 G00 G43 Z0 H01；

以下程序段的写法与上述程序段的写法 Z 轴移动效果相同。

方法一：G90 G54 G00 X_Y_；

G43 Z0 H01；

方法二：G90 G54 G00 X_ Y_；

G43 H01；

采用机上刀具长度测量偏置法执行的程序不用变化，仅仅是将工件坐标系中存储的 Z 轴偏置值设置为零即可。读者可按照这种方法阅读前面的 O3710 程序。

采用机上刀具长度测量偏置法的优缺点与标准刀长度偏置法相同。

3.4　孔特征加工固定循环指令

孔是机械制造中常见的加工特征。孔的加工动作相对固定，但若用基本指令 G00/G01 等进行编程，程序将会变得长而繁琐。为此，FANUC 0i MC 系统提供了专用的孔加工固定循环指令。

3.4.1　孔特征与固定循环加工指令的引出

（1）各类孔特征与加工特点分析　孔是实际加工中常见的几何特征之一，如图 3-73 所示。孔按特征不同分为光圆孔、螺纹孔、阶梯孔、沉孔、不通孔、通孔等；按长度不同分为定位孔窝、浅孔、深孔等。孔的加工方式有钻孔、扩孔、铰孔、锪孔、镗孔等。孔加工用到的刀具包括钻头（常见的是麻花钻）、扩孔钻、铰刀（机用）、中心钻、锪钻（平底和锥面等）、镗刀等。

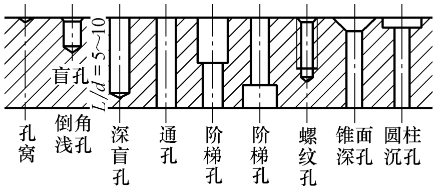


图 3-73　各种几何特征的孔

各种几何特征与加工精度等要求不同，导致其加工工艺存在差异。以一般形式的光孔加工为例，其典型工艺方案见表 3-2。

表 3-2 H13 ~ H7 孔加工方案（长径比小于 5）

孔的精度	在实体上加工孔	预先制作出底孔
H13 ~ H12	一次钻孔	扩孔或粗镗孔
H11	孔径≤10mm，一次钻孔 孔径 > 10 ~ 30mm，钻孔—扩孔 孔径 > 30 ~ 80mm，钻孔—扩孔或钻孔—扩孔—镗孔	孔径≤80mm，粗扩—精扩或粗镗—精镗，或根据余量一次扩孔或镗孔孔径 > 80mm，铣孔
H10 ~ H9	孔径≤10mm，钻孔—铰孔 孔径 > 10 ~ 30mm，钻孔—扩孔—铰孔 孔径 > 30 ~ 80mm，钻孔—扩孔—镗孔	孔径≤80mm，粗镗孔—精镗孔 孔径 > 80mm，粗铣孔—精铣孔或粗铣孔—精铣孔
H8 ~ H7	孔径≤10mm，钻孔—扩孔—铰孔 孔径 > 10 ~ 30mm，钻孔—扩孔—粗铰—精铰 孔径 > 30 ~ 80mm，钻孔—扩孔—粗镗—精镗	孔径≤80mm，粗镗孔—半精镗孔—精镗孔

就光孔特征而言，孔窝常用于后续孔的定位孔，其加工要求定位精度高；深孔加工主要的技术问题是如何有效地排屑、断屑与冷却；不通孔加工可能有深度尺寸以及孔底平面要求，而通孔加工必须考虑钻头超出材料距离；阶梯孔的特点是阶梯面往往是一个平面，与其类似的沉孔加工也是要求底面或锥面是一个回转体表面；钻孔加工精度不高，扩孔、铰孔虽然能提高尺寸精度，但其垂直度无法纠正，镗孔不仅可保证加工精度，还能纠正孔的垂直度误差，但其要求必须有预孔；钻孔加工可适应不通孔加工，而铰孔必须有预制孔，包括铸、锻件预制孔的粗镗，以及扩孔、粗镗孔后的精镗；机床上铰孔常常是在孔中轴向往复移动加工；螺纹加工一般用丝锥加工，其要求轴向进给量等与螺纹导程有关，攻螺纹至孔底后必须停钻后反转退出。另外，利用数控铣削加工轨迹可编程控制的特点，还可见铣削圆孔与螺纹的方式，当然这超出了孔加工固定循环指令讨论的范畴。

以上分析想说明的是，各种特征的孔，加工工艺是不同的。学习孔加工固定循环指令不能简单停留在分析孔加工动作上，而应将孔的动作与相应孔加工特征联系起来学习。这种学习思路使“数控编程”上升为“数控加工编程”，这是学习数控加工的最终目的。

虽然孔加工形式、长度、刀具多样，各种孔加工有一定的要求，但其也有许多固定的特点。孔加工应用的广泛性、加工动作的典型化与趋同性等，为简化编程指令提出了需求和可能，铣削加工编程中的孔加工固定循环指令便是一个典型案例。

（2）孔加工固定循环基本知识　在讨论孔加工固定循环指令之前，需要了解以下基本概念：

1）一个钻孔平面及钻孔轴。钻孔平面又称定位平面或加工平面，立式数控铣床默认的钻孔平面是 XY 平面（G17 指定）。与钻孔平面垂直的坐标轴称为钻孔轴，显然立式铣床的钻孔轴是 Z 轴。

2）两个定位轴。定位轴是确定钻孔平面上孔位置的坐标轴，立式铣床为 X 轴与 Y 轴。

3）三个 Z 轴方向上的工艺点/平面。孔加工固定循环中，在 Z 轴方向上有三个必须引起重视的工艺点或平面，参见图 3-75，具体叙述如下。

① 初始平面：初始平面是 Z 轴方向上的一个安全平面，刀具首次的定位动作在这个平面中移动，其高度必须确保刀具横向移动定位过程中不与工件或夹具等相碰撞。刀具移动至初始平面高度的动作必须在固定循环指令之前通过其他移动指令实现。

② R 点或 R 平面：又称参考点或参考平面，是钻孔快速下刀与进给钻孔进刀的转换点。对于多个钻孔而言，当工件表面为平面且表面平整度较好时，孔与孔之见的移动定位可以在 R 点所在平面中进行，这时可称为 R 平面。R 点与工件表面之间的距离一般取 2 ~ 5mm，粗糙毛坯表面可取 5 ~ 10mm，攻螺纹时该距离还可适当增大。R 点高度的选择必须确保刀具不与工件出现刚性碰撞。

③ 工件表面：对应工件物理表面的平面，它常常是高度方向的基准，如作为初始平面与参考平面的参照基准，并且还是孔深度的基准。实际中，工件坐标系原点也常常取在此平面。

4）四个基本移动，指固定循环过程中用到的四个基本移动，包括：快速移动（相当于 G00）、切削加工移动（相当于 G01）、刀具暂停（相当于 G04）和横向偏移退刀（移动距离、方向与速度由系统参数设置）。

5）五个图解符号，描述孔加工固定循环指令图解的五个基本图形符号，如图 3-74 所示。

6）六个基本顺序动作。参见下文分析，这六个动作不一定每个指令都有。

（3）孔加工固定循环六个基本顺序动作　孔加工固定循环主要由六个基本的顺序动作组成，如图 3-75 所示。

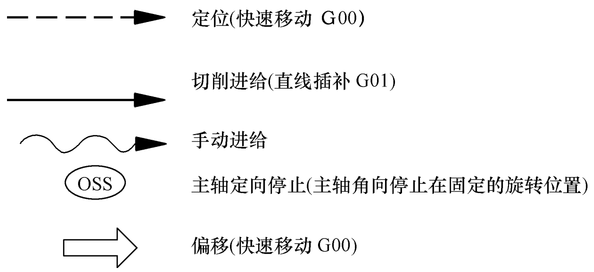


图 3-74　五个图解符号

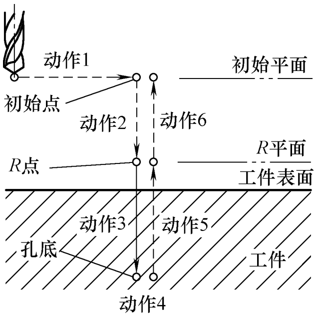


图 3-75　固定循环的基本动作

动作 1：钻孔轴在初始平面中的孔中心定位动作，如立式铣床在 X 轴和 Y 轴的定位。

动作 2：快速下刀至 R 点/平面，即参考平面。

动作 3：孔的切削加工，一直切削加工至孔底。该动作可能是一次加工至孔底，也可能是分段加工至孔底。孔底的 Z 坐标要根据具体情况而定，对于通孔要考虑切出距离，一般可取 $0.3d+(1\sim2)$ mm（d 为钻头直径），如图 3-76 所示。

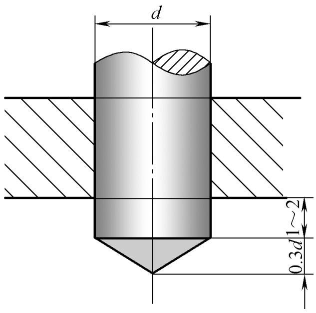


图 3-76　钻通孔的切出量

动作 4：孔底位置的动作（如主轴暂停、主轴停转、主轴定向停止并刀尖反方向偏移、反方向旋转等）。

动作 5：返回到 R 点/平面，返回速度根据具体指令有所不同，包括手动返回方式。

动作 6：快速提刀至初始平面，一个动作循环结束。

注意：以上六个基本顺序动作依照指令不同而略有不同。如有的指令没有孔底动作。有的指令动作 5 与动作 6 连续进行，一气呵成，给人感觉是仅有动作 5。另外，初始平面高度位置是固定循环指令之前的程序段完成。

（4）孔加工固定循环指令的基本格式　孔加工固定循环指令能够在一个程序段中将孔

加工的参数完全描述出来，其固定循环指令虽然复杂一点，但是整个程序看上去却是简化了许多。以立式铣床为例，其钻孔平面为 *XY* 平面，钻孔轴为 *Z* 轴，孔加工固定循环指令的基本格式为：

$$\left\{\begin{matrix} G90 \\ G91 \end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix} G98 \\ G99 \end{matrix}\right\}G_X_Y_Z_R_P_Q_F_K_;$$

指令中各代码的含义如下：

1）G90/G91：数值 X_Y_Z_R_的输入方式，G90 为绝对坐标输入，G91 为增量坐标输入，默认设置为 G90。*R* 和 *Z* 坐标值描述如图 3-77 所示。

2）G98/G99：孔加工完成后的返回控制指令，如图 3-78 所示。G98 为返回至初始平面高度，G99 为返回至 *R* 平面高度。G98 为默认指令。

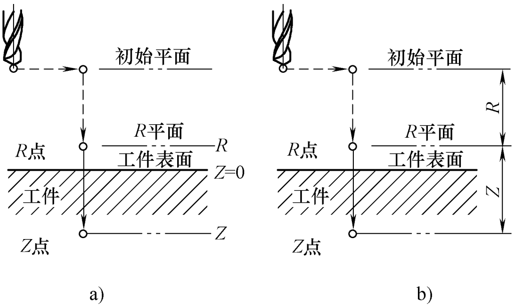


图 3-77 绝对坐标与增量坐标编程

a）绝对坐标（G90） b）增量坐标（G91）

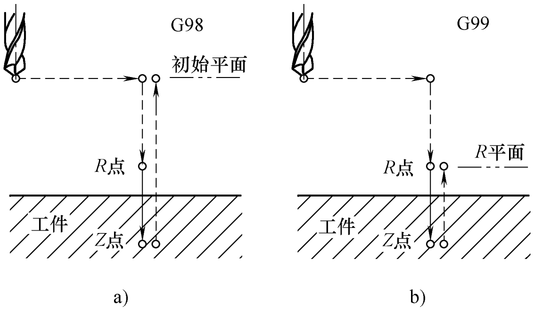


图 3-78 加工完成后自动退刀时的抬刀高度指令

a）G98 返回至初始平面 b）G99 返回至 *R* 平面

3）G_：孔加工方式，表 3-3 中除 G80 之外的其他孔加工固定循环指令。

4）孔加工数据：随不同的加工指令而略有不同，主要包括以下数据：

① 孔位数据 X_Y_：确定孔加工的中心位置参数，可用绝对坐标或增量坐标指定，孔位之间的移动为快速移动。

② 孔底数据 Z_：指定钻孔轴孔底位置数据，即孔的深度，可用绝对坐标或增量坐标指定。

③ *R* 点/平面数据 *R*_：指定 *R* 点/平面高度坐标值，可用绝对坐标或增量坐标指定，从初始平面至 *R* 平面或从 *R* 平面至初始平面的刀具移动速度均同 G00 的快速移动速度。

④ 暂停时间 P_：孔底暂停时间，指令格式同 G04。单位为 0.001s（ms），指令值范围为 1～99999999，例如 P1500 表示 1.5s。

⑤ Q_：在不同的固定循环中有所差异，深孔加工（G73、G83）时为每次下钻的进给深度，镗孔加工（G76、G87）时为刀具在孔底的横向偏移量。

⑥ F_：钻孔加工进给速度。对于攻螺纹加工，$F=nP_h$，其中，n 为主轴转速（mm/r），P_h 为螺纹导程（mm）。

5）K_：指令程序段重复执行次数，K 的取值范围为 0～9999，其中 K1 为默认值，可以不写。

（5）FANUC 0i MC 系统孔加工固定循环指令组　FANUC 0i MC 系统在总结了各类孔加工的基础上开发出的一组专用的孔加工固定循环指令，见表 3-3。

表 3-3　FANUC 0i MC 系统固定循环指令组

G 代码	切削动作（－Z 方向）	孔底动作	退回动作（＋Z 方向）	功　　用
G73	间隙进给	—	快速退回	快速深孔钻循环
G74	切削进给	停刀→主轴正转	切削进给	攻左旋螺纹循环
G76	切削进给	主轴定向停止	快速移动	精镗循环（不刮伤表面）
G81	切削进给	—	快速移动	钻孔循环，点钻循环
G82	切削进给	停刀	快速移动	钻孔循环，锪孔、阶梯孔循环
G83	间隙进给	—	快速移动	深孔钻循环
G84	间隙进给	停刀→主轴反转	切削进给	攻右旋螺纹循环
G85	切削进给	—	切削进给	镗孔循环
G86	切削进给	主轴停止	快速移动	镗孔循环（刮伤一条线）
G87	切削进给	主轴正转	快速移动	背镗循环
G88	切削进给	停刀→主轴停止	手动移动	镗孔循环（手动操作返回）
G89	切削进给	停刀	切削进给	镗孔循环
G80	—	—	—	取消固定循环

（6）取消孔加工固定循环　从表 3-3 中可以看到，系统专门设计了取消固定循环指令 G80。当系统执行了 G80 指令后，取消所有固定循环，返回到正常的三坐标联动工作状态，此时，R 点和 Z 点模态数据也被取消，在增量方式中，$R=0$ 和 $Z=0$。其他孔加工固定循环指令所保持的模态数据也被取消（清除）。另外，在固定循环指令执行期间，若执行了 01 组中的 G 指令（G00、G01、G02、G03 和 G60），系统也将取消固定循环。注意，取消固定循环指令时，指令中的 F 值不取消。

（7）编程技巧与禁忌

1）固定循环指令之前的程序指定初始平面高度位置，且一般在固定循环指令之前用辅助指令 M03 指定主轴旋转。

2）G90/G91 的编程技巧。绝对坐标（G90）输入时，R 和 Z 坐标指工件坐标系中的绝对坐标；增量坐标（G91）输入时，R 为初始平面至 R 平面的有向距离，Z 为 R 平面至孔底的有向距离，显然均为负值。注意对图 3-77 的理解。

3）G98/G99 的应用技巧。对于工件表面较为平整，孔之间 R 平面内移动无干涉现象时，用 G99 返回，但钻最后一个孔时，一般用 G98 返回至初始平面高度。

4）若指令中为未指定孔位数据 X_Y_时，则系统默认为刀具当前位置。

5）需要指定暂停时间的指令中未指定暂停时间时，程序执行准确停止检查，即在接近孔底时进行减速，执行“到位”检查，然后转入下一个程序段。

6）参数 Q 为无符号增量值，即其始终为正值。若指定为负值，系统忽略。

7）表 3-3 所列的所有固定循环指令（含 G80）是同组的模态指令，可以相互注销。

8）上述孔加工参数 X_、Y_、Z_、R_、Q_、F_以及初始平面高度等均为模态参数，其中 R_、Q_参数必须在钻孔的程序段中指定与修改，否则不能作为模态参数保存。

9）参数 K 的应用技巧。当指定 K0 时，仅保存固定循环指令中孔加工的模态数据，如 Z_、R_、Q_等，但不执行孔加工循环；当采用增量坐标输入（G91）时，可对等间距孔进行逐孔加工。如采用绝对坐标输入（G90），则仅在同一位置执行重复钻孔动作。注意比较与体会以下两程序段的区别：

G91 G81 X_Y_Z_R_F_K5；指令的执行动作如图 3-79a 所示，连续加工 5 个等距孔。

G90 G81 X_Y_Z_R_F_K5；指令的执行动作如图 3-79b 所示，仅在原地加工 5 次。

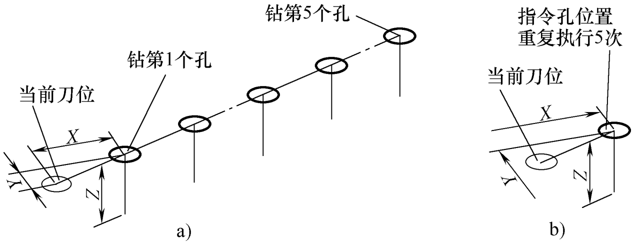


图 3-79 参数 K 与 G90/G91 的关系
a）G91 指定加工 5 个等距孔 b）G90 指定原地重复加工 5 次

参数 K 与增量坐标输入方式常用于等距整列多孔的加工，应用广泛。

10）固定循环中指定刀具长度偏置（G43 或 G44）时，在定位到 *R* 点的同时加偏置。

11）缺少参数 X、Y、Z、R 其中之一的程序段上不执行钻孔。

12）固定循环执行过程中，如果按下 MDI 面板上的复位键 RESET，则孔加工方式、孔加工数据、孔位置数据、重复执行次数等模态参数均被取消。

3.4.2 FANUC 0i 系统孔特征加工指令分析

1. 钻孔加工循环指令 G81/G83/G73 动作分析与应用技巧

（1）钻孔加工刀具分析 钻孔加工属定尺寸刀具加工，加工精度（标准公差等级）不超过 IT10，表面粗糙度 *Ra* 为 12.5μm 左右，属粗加工。钻孔加工的刀具俗称钻头，按刀具结构形式不同有整体式、焊接式与机夹式，如图 3-80 所示。图 a 所示整体式刀具，常用于加工小直径孔，刀具材料为高速钢或硬质合金，其切削速度稍低，但进给量可稍大，加工精度相对较高，适合于一般深度孔加工，钻头可重磨。图 b 所示为头部铜质焊料钎焊硬质合金刀片的焊接式钻头，适合加工中等尺寸孔，比整体硬质合金刀具成本低，但焊接处易损坏。图 c 所示机夹式钻头，其刀片一般为可转位机械夹固形式，适合于中等或稍大尺寸孔的加工，其加工精度和孔的深度受一定的限制。图 d、e 所示钻头中部制造了冷却孔，可将切削液高效地输送到钻削加工区，但其制造复杂。

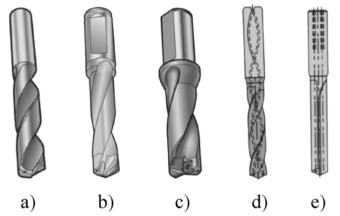


图 3-80 刀具结构形式
a）整体式 b）焊接式 c）机夹式
d）、e）内冷式

（2）钻孔加工工艺问题分析与对策

1）冷却问题与对策。钻头的主切削刃在钻头端面，加工时在材料内部，散热效果差，因此，钻孔加工过程中不能忽视冷却问题。常规外冷却方式切削液不易进入，且流入通道（钻头的螺旋槽）与排屑通道共用，运动方向相反，冷却效果较差。采用内冷式钻头（见图 3-80d、e），使切削液直接进入切削区是有效的措施，但要求刀柄与机床有该项功能。内冷式钻头对深孔加工效果明显。当然，中途的提刀动作也是应对冷却的常用方法之一。

2）断屑与排屑问题与对策。长径比较小的一般孔加工，可不考虑断屑与排屑问题，但深孔加工则必须重视断屑与排屑问题。钻孔加工的切屑形态与工件材料性能、切削速度、进给速

度等因素有关。带状切屑排屑效果较好，长而卷曲的螺旋状切屑易堵塞在螺旋槽中，且越堵越紧，太碎的切削更不易从螺旋槽中直接排出。断屑的措施是：钻头钻入一定深度后，停顿或回退一点，可有效断屑。而完全回退到孔口外部则不仅可断屑，还可有效将切屑排出。

另外，采用内冷却方式，切削液在一定压力与流量作用可顺着容屑槽将切屑带出，其排屑效果也是不错的，特别是图 3-80e 所示的直槽内冷式钻头（俗称枪钻）。

断屑与排屑是深孔加工必须考虑的问题。关于深孔定义不应拘泥于资料上的推荐值（如长径比大于 5 ~ 10），而应该根据现场情况判断确定，因此，对于深孔加工编程者最好能到现场调整相关参数。

3）孔加工位置精度问题与对策。钻头本身一般较细长，表现为刚性差，当加工表面较粗糙、有少量的斜度，或钻头切削刃不对称产生横向力时，均会造成加工孔位置的误差。特别是深孔加工时，若钻入时有一点歪斜，随着深度的增加，垂直度误差就会加大。对于这个问题，其对策是采用刚性较好的定心钻预钻孔窝。图 3-81 所示为定心钻及其预钻孔窝示例。这种定心钻仅端面有切削刃，螺旋槽短，整个钻头粗而短，刚性较好，所钻出的孔窝位置精度较高。另外，车削加工中的中心钻也常被用作定心钻。

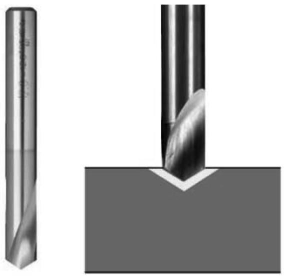
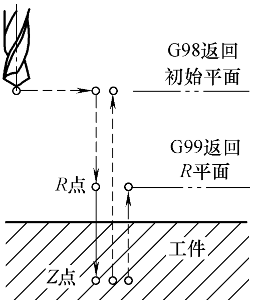
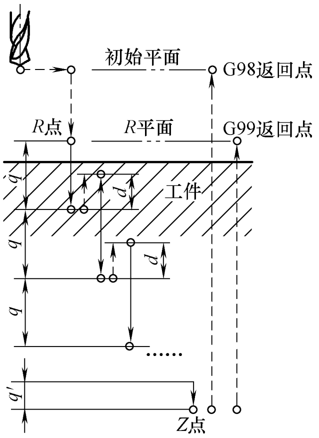


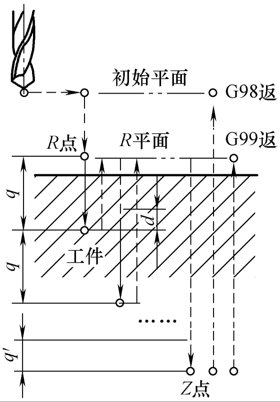
图 3-81　定心钻与预钻孔窝

（3）指令 G81/G83/G73 动作分析　这三个指令为钻孔加工固定循环指令，用于实体材料上进行不通孔、通孔及定位孔窝等的加工，也可用于扩孔等加工。其动作循环见表 3-4。

表 3-4　钻孔加工固定循环指令

指　令	动作图解	说　明
G81		名称：钻孔、扩孔循环指令 指令格式：$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$G81X_Y_Z_R_F_K_； 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 R 平面→进给钻孔至深度 Z 点→快速退刀至 R 平面或初始平面。无动作 4 存在问题：不能加工深孔 应用：主要用于常规的钻孔和孔窝加工以及扩孔等加工，不考虑断屑与排屑问题，所钻孔的深度不宜太大
G73		名称：断屑式深孔钻孔循环指令 指令格式： $\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$G73X_Y_Z_R_Q_F_K_； 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 R 平面→进给钻孔距离 q，退刀 d→进给钻孔距离 q，退刀 d→……→进给钻孔至 Z 点→快速退刀至 R 平面或初始平面。无动作 4。动作 3 多次退刀实现断屑 存在问题：仅解决断屑问题，排屑效果仍略差，切削液进入孔底加工区受影响 应用：适合钻头强度较好且要求加工效率高的深孔钻孔加工，排屑与冷却效果弱于 G83，加工效率高于 G83

（续）

指　令	动作图解	说　明
G83		名称：排屑式深孔钻孔循环指令 指令格式： $\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$G83 X_Y_Z_R_Q_F_K_； 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 R 平面→进给钻孔距离 q，提刀至 R 平面→进给钻孔距离 q，提刀至 R 平面→……→进给钻孔至 Z 点→快速退刀至 R 平面或初始平面。动作 3 多次提刀实现排屑，无动作 4 存在问题：加工效率略低于 G73 应用：较好地解决断屑与排屑问题，切削液也可较好地进入孔底加工区。适合深孔、小直径、易折断钻头的钻孔加工

（4）指令 G81/G73/G83 应用技巧与禁忌

1）G73 指令中的退刀量 d 由系统参数 No. 5114 设定（大于或等于 0 即可），G83 指令中的留空量 d 由系统参数 No. 5115 设定（必须大于 0），程序中不能指定。

2）钻孔加工必须保证加注切削液，尽可能避免干切削。

3）普通钻孔指令 G81 与深孔钻孔指令 G73/G83 不要拘泥于长径比，而应以实际加工的断屑与排屑情况为依据，因为数控加工是自动进行，加工过程中不宜人工实施干预。

4）深孔钻削尽可能先钻孔窝，尽量采用专用的深孔钻和具有较好定心功能的钻头，尽可能采用内冷却方式冷却，其不仅冷却效果好，而且还有利于排屑，特别是直槽内冷式钻头排屑效果更佳。

5）尽可能不用手工刃磨的钻头，而采用专用工具磨床刃磨的钻头，或用机夹式钻头。手工刃磨难以保证切削刃的对称性。

6）孔加工表面粗糙不平时，易造成崩刃，建议先用较低的进给速度预钻孔窝或浅孔。

7）钻头与加工面尽可能垂直，倾斜角度不大于 2°，对于倾斜角度 5°～10°的表面，可用刚度较好的定心钻预钻孔窝，大于 10°的表面必须预先铣出一个平面再钻孔。

8）FANUC 0i-MC 官方编程手册上并未专门指定扩孔加工指令，但从扩孔加工工艺分析，指令 G81 较为合适。关于经典的“钻-扩-铰”工艺中的铰孔加工，可采用下文将要介绍的 G85 或 G89 指令。

（5）编程示例　用 G81 指令编程加工图 3-82 所示中的 5 个孔，程序中钻 1～4 号孔时返回的是参考平面，钻完 5 号孔后返回初始平面。加工程序如下：

```
O3820;
N10 G40 G80 G49;
N20 G90 G55 G00 X0 Y55. Z150. ;
N30 S600 M03;
N40 G43 Z50. H01;
```

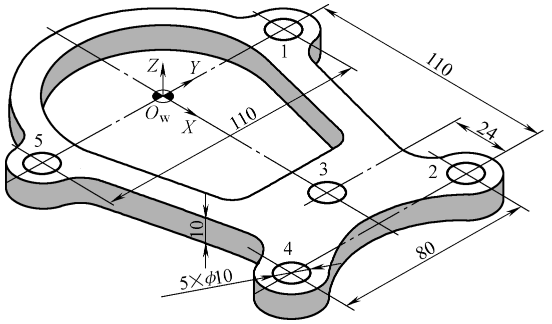


图 3-82　G81 指令编程示例图

```
N50 G99 G81 X0 Y55. Z-12.5 R3. F80;        钻 1 号孔
N60 X100. Y40.;                            钻 2 号孔
N70 X76. Y0;                               钻 3 号孔
N80 X100. Y-40.;                           钻 4 号孔
N90 G98 X0 Y-55.;                          钻 5 号孔
N100 G80 G49 G00 Z150.;
N110 M30;
```

编程技巧分析：

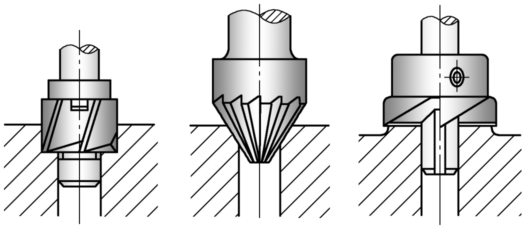
1）固定循环指令为模态指令，在 N50 指令完 G81 后，初始平面、参考平面、孔底深度等参数具有续效性，因此 N60～90 程序段只需指定变化的孔位参数 X_Y_即可。

2）N100 程序段的 G80 可以不写，因为该程序段有 01 组的 G00 指令。但这种写法表现出固定循环指令的指定与取消一般成对出现。

3）N100 程序段的 G49 也有很多人不写，但若程序最高点接近 Z 轴上止点时，容易出现 Z 轴超程现象。

2. 锪孔加工循环指令 G82 动作分析与应用技巧

（1）锪孔加工刀具分析　锪孔加工指在已加工的孔上加工圆柱沉孔、锥形沉孔和凸台平面等，如图 3-83 所示。传统加工的锪钻常常带有一个导柱导向。对于数控加工而言，其定位精度较高，只要刀具等刚性足够，可以不用导柱，因此，数控锪孔加工的刀具选择空间更大。图 3-84 所示为锪孔钻示例，图 a 为整体平底钻头，图 b 为机夹式平底钻头。另外，为提高加工效率，还可将锪孔与钻孔钻头做成复合形式，图 c 所示为整体式“钻孔-倒角”复合钻头，图 d 所示为机夹式“钻孔-锪圆柱沉孔”复合钻头。



a)　b)　c)

图 3-83　锪孔加工的概念

a）锪圆柱沉孔　b）锪圆锥沉孔　c）锪凸台平面

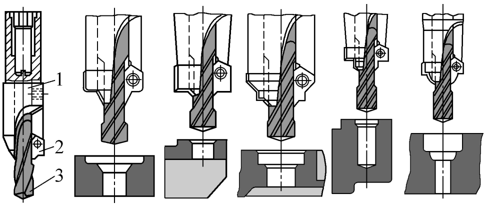
由于锪孔加工是在钻孔基础上的加工，钻-锪组合的市场空间很大，因此，有的专业厂家提供了模块化的定制服务，如图 3-85 所示。图 a 所示为组合钻头示意图，刀片 2 和钻头 3 为可选件，配置稍加变化便可得到图 b～f 所示的各种组合方案。图 b 所示为钻孔＋锪浅的沉孔与倒角，图 c 所示为钻孔＋倒角＋锪平面，图 d 所示为钻孔＋锪螺钉头沉孔＋倒角，图 e所示为钻螺纹底孔＋锪保护孔，图 f 所示为钻孔＋锪特制异形孔。

a)　b)　c)　d)

图 3-84　锪孔和复合钻头

a）整体平底钻头　b）机夹式平底钻头

c）、d）复合钻头



a)　b)　c)　d)　e)　f)

图 3-85　组合式钻-锪钻头

a）组合钻结构示意图　b）～f）组合方案

1—刀柄　2—刀片　3—钻头

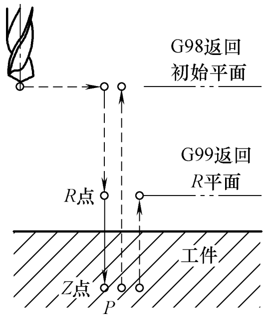
（2）锪孔加工工艺问题分析　锪孔加工的孔，其几何特征主要表现在加工面必须是一个回转体表面。钻孔加工时其切削刃上的某一切削点为刀具旋转与轴向进给的组合运动，其运动轨迹为螺旋线。若锪孔钻按此运动轨迹加工，其加工面将是一个螺旋形的表面，显然不能满足锪孔的使用需要。如圆柱锪孔钻用钻孔指令 G81 加工，其底面为一螺旋面，使用中若为圆柱头螺钉装入其中，理论上的接触面实际上是一个点，考虑螺钉拧紧后的弹性变形，故螺钉是歪斜的，这种紧固形式与设计要求不相符。要解决这个问题，只需在锪孔钻钻至孔底时有一个轴向暂停动作，确保刀具旋转一圈以上，则可加工出锪孔所需的回转体表面。明白了这个道理，对锪孔加工指令的应用就不难理解了。

锪孔加工孔底暂停时间的设置是该指令应用的重点。由以上分析可知，只需轴向暂停状态下刀具旋转一圈以上即可，但从金属切削原理的角度看，适当旋转几圈，有利于锪孔面加工质量的提高，但这时的加工是无背吃刀量的加工，旋转太多的圈数不仅不利于加工面质量的提高，而且切削刃磨损严重，因此，暂停 0.5 ~ 1.0s 较为合适。

从加工切削角度而言，若用平底钻头、平底铣刀或钻-锪复合钻头等加工阶梯孔时，也可以用 G82 指令加工，其加工原理是相同的。

（3）指令 G82 动作分析　参见表 3-5。

表 3-5　锪孔加工固定循环指令

指　　令	动 作 图 解	说　　明
G82		名称：锪孔加工固定循环指令 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G82X_Y_Z_R_P_F_K_； 动作说明：与钻孔循环指令 G81 相比增加了一个孔底暂停动作（动作 4），孔底暂停时间必须确保刀具旋转一圈以上 存在问题：无 应用：适用于锪孔加工或阶梯孔加工

（4）指令 G82 应用技巧与禁忌　G82 指令与 G81 指令的差异主要在于孔底暂停动作，编程技巧主要在于孔底暂停时间，一般取 0.5 ~ 1.0s 即可。G82 指令一般用于已钻孔的加工，比 G81 钻不通孔的冷却与断屑条件均好。

（5）编程示例　图 3-86 所示零件，试用 G81 钻 4 × ϕ11 孔，用 G82 指令锪 4 × ϕ20 孔。为扩大视野，特分三种形式书写程序，供参考。

方案一：以数控铣床为对象，手工换刀，程序中 T01 为 ϕ11 麻花钻，T02 为 ϕ20 平底阶梯钻，加工程序如下：

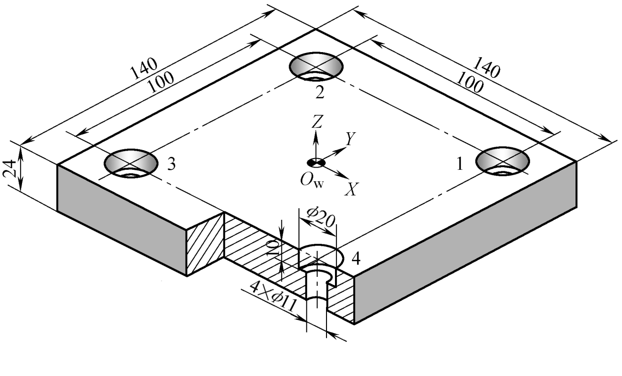


图 3-86　G82 指令应用示例

```
O3861;                                   程序名称(数控铣床用程序)
N10 G40 G80 G49;                         程序初始化,手工换 T01 号刀
N20 G90 G55 G00 X0. Y0. Z150. ;          选择工件坐标系,快速移动至起始点 S
N30 M03 S600;                            主轴正转,转速为 600r/min
N40 G43 Z50. H01 M08;                    快速下刀至初始平面,启动长度正补偿,开切削液
N50 G99 G81 X50. Y50. Z-30. R3. F60;     指令 G81,钻 1 号孔,返回参考平面
N60 X-50. ;                              钻 2 号孔
N70 Y-50. ;                              钻 3 号孔
N80 G98 X50. ;                           钻 4 号孔,返回初始平面
N90 G80 G00 X0 Y0 M09;                   取消固定循环指令,关切削液
N100 G49 Z150. M05;                      提刀至起始点 S,主轴停转
N110 M00;                                程序暂停,手工换 T02 号刀
N120 M03 S500;                           主轴正转,转速为 600r/min
N130 G43 Z50. H02 M08;                   快速下刀初始平面,启动刀具长度正补偿,开切削液
N150 G99 G82 X50. Y50. Z-10. R3. P500 F50;  指令 G82 指令,锪 1 号孔,返回参考平面
N160 X-50. ;                             锪 2 号孔
N170 Y-50. ;                             锪 3 号孔
N180 G98 X50. ;                          锪 4 号孔,返回初始平面
N190 G80 G00 X0 Y0 Z150.  M09;           取消固定循环指令,关切削液
N200 M30;                                程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：

1）用 M00 暂停程序，进行手工换刀。

2）由于需要两把刀具，因此程序中必须应用刀具长度偏置指令。

方案二：以加工中心为对象，用子程序调用的方式编程，程序中 T01 为 ϕ11 麻花钻，T02 为 ϕ20 平底阶梯钻，加工程序如下：

```
O3862;                                程序名称(加工中心用程序))
N10 G40 G80 G49;                      程序初始化
N20 G91 G30 Z0;                       快速返回换刀点
N30 T01 M06;                          换 T01 号刀
N40 G90 G55 G00 X50. Y50. ;           选择工件坐标系,XY 平面快速移动至 1 号孔上方
N50 S600 M03;                         主轴正转,转速为 600r/min
N60 G43 Z50. H01 M08 T02;             快速下刀初始平面,启动长度正补偿,开切削液,选 T02 号刀
N70 G99 G81 Z-30. R3. F60 K0;         指令 G81 循环指令参数
N80 M98 P3860;                        调用子程序 O3860,钻 1 ~4 号孔
N90 G80 G49 G00 Z50. M09;             快速提刀至初始平面,取消固定循环与长度偏置
N100 G91 G30 Z0;                      快速返回换刀点
N110 M06;                             换 T02 号刀
N120 G90 G55 G00 X50. Y50. ;          选择工件坐标系,XY 平面快速移动至 1 号孔上方
N130 S500 M03;                        主轴正转,转速为 500r/min
N140 G43 Z50. H02 M08 T01;            快速下刀,启动长度正补偿,开切削液,选 T01 号刀
N145 G99 G82 Z-10. R3. P500 F50 K0;   指令 G81 循环指令参数
N150 M98 P3860;                       调用子程序 O3860,锪 1 ~4 号孔
N160 G80 G49 G00 Z50. M09;            快速提刀至初始平面,取消固定循环与长度偏置
```

```
N165 G91 G30 Z0;                          快速返回换刀点
N170 M06;                                 换 T01 号刀
N260 M30;                                 程序结束,返回程序头

O3860;                                    子程序名
N10 X50. Y50. ;                           指定 1 号孔位参数
N20 X-50. ;                               指定 2 号孔位参数
N30 Y-50. ;                               指定 3 号孔位参数
N40 X50. ;                                指定 4 号孔位参数
N50 M99;                                  子程序结束,返回主程序
```

编程技巧分析：

1）用子程序指定孔位参数，重复调用，在孔的数量较多或同一孔位工序较多时效果明显。

2）用参数 K0 指定固定循环参数（注意未钻孔）。

3）选刀指令 T××与换刀指令 M06 分开指定，有利于提高加工效率。

4）N90 与 N160 程序段的 G80 指令可以不写，因为程序段中有 01 组的 G00 指令。

方案三：以专用的“钻孔-锪圆柱孔”复合钻头为刀具，数控铣床或加工中心均可，加工程序如下：

```
O3863;                                    程序名称(复合钻头用程序))
N10 G40 G80 G49;                          程序初始化,手工换 T01 号刀
N20 G90 G55 G00 X0. Y0. Z120. ;           选择工件坐标系,快速移动至起始点 S
N30 M03 S500;                             主轴正转,转速为 500r/min
N40 G43 Z50. H01 M08;                     快速下刀至初始平面,启动长度正补偿,开切削液
N50 G99 G82 X50. Y50. Z-30. R3. P500 F50; 指令 G82 指令,钻 1 号孔,返回参考平面
N60 X-50. ;                               钻 2 号孔
N70 Y-50. ;                               钻 3 号孔
N80 G98 X50. ;                            钻 4 号孔,返回初始平面
N90 G80 G00 X0 Y0 Z120. M09;              取消固定循环指令,返回起始点 S,关切削液
N100 M30;                                 程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：采用专用钻头可显著简化编程，但刀具需要定制，且需要调整。

3. 攻螺纹循环指令 G84/G74

（1）螺纹孔加工刀具——丝锥分析　中小尺寸内螺纹多采用“钻螺纹底孔（含倒角）—攻螺纹”的加工工艺，其用到的刀具称为丝锥或丝攻，如图 3-87 所示。丝锥属定尺寸刀具，实际生产中应用广泛。按驱动方式不同，丝锥可分为手用丝锥与机用丝锥两种。数控加工多采用后者，其为单锥形式，即用一把丝锥直接加工至尺寸，尾部为方榫形式。按容屑槽的不同，丝锥可分为直槽、斜槽与螺旋槽三种。直槽丝锥结构简单，成本较低，应用广泛，有时在前段的切削段磨出刃倾角，可控制切屑向前排出，同时提高切削刃的锋利程度；螺旋槽丝锥可控制切屑向后排出，特别适合于不通孔攻螺纹，且较大的

a)　　b)

图 3-87　丝锥的形式

a）直槽丝锥　b）丝锥头部结构

螺旋角对提高刀具的锋利程度效果明显，当然，对切削刃的强度也是有影响的，一般加工黑色金属，螺旋角在 30°左右，而加工有色金属，螺旋角可达 45°，螺旋槽加工复杂，成本较高；斜槽丝锥是介于直槽与螺旋槽之间的一种结构形式，其突出优点是容屑槽加工较为方便，按斜槽的方向不同，可做成切屑前排或后排的形式。按螺纹旋向加工的需要，丝锥也分为左旋丝锥与右旋丝锥。丝锥工作部分涂层是提高刀具寿命的较好手段。国内丝锥牙型最常见的为米制制式。

（2）攻螺纹工艺问题分析　数控攻螺纹加工时，轴向进给与主轴转速必须保持严格的比例，即主轴旋转一圈，丝锥轴向移动一个导程（或螺距）。另外，攻螺纹加工切削条件相对较差，因此，工艺上需考虑以下问题：

1）螺纹加工属定尺寸加工，其加工质量主要取决于丝锥精度，适合于中小尺寸螺纹的制造。

2）螺纹底孔要适当，对塑性较好的材料，孔径可适当偏大。同时，孔口要倒角。

3）润滑冷却是必需的。对于钢料，直接用浓度较大的乳化液或机油即可，要求较高的可用菜油或二硫化钼等。对于不锈钢，可用 30 号机油或硫化油。

4）要注意切屑的排出，特别是不通孔攻螺纹，除选用螺旋丝锥外，孔底还需留有适当空间。

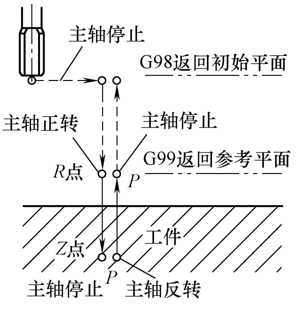
5）攻螺纹加工轴向进给与主轴转速必须保持严格的比例关系。对于主轴具有准停功能的数控机床（如加工中心等），可采用“刚性攻螺纹”，并可对同一螺纹孔进行多次攻螺纹，这对较深的螺纹孔加工是必要的。对于不具有主轴准停功能的数控铣床，一般采用“柔性攻螺纹”，依靠丝锥夹头的轴向螺距误差补偿进给速度与丝锥螺距的误差问题。

6）数控加工的丝锥尽可能选择整体硬质合金材料，且尽可能选择涂层丝锥，减少机床调整时间是提高数控加工效率的重要途径之一。

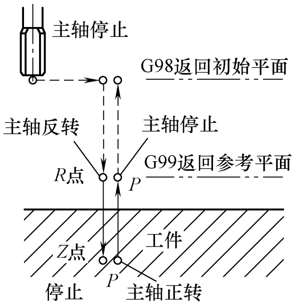
7）丝锥极易折断，编程和加工过程中应时刻注意，如改变加工参数，或改变刀具和程序等。

（3）攻螺纹循环指令 G84/G74 动作分析　指令 G84/G74 分别是为攻右旋螺纹和左旋螺纹而设计的，见表 3-6。

表 3-6　攻螺纹固定循环指令

指　　令	动作图解	说　　明
G84		名称：攻右旋螺纹固定循环指令 指令格式：$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$G84X_Y_Z_R_P_F_K_； 动作说明：主轴停转状态下初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→主轴正转并按 F 指定速度攻螺纹至深度 *Z* 点→主轴停转并暂停→主轴反转按 F 指定速度进给退刀至 *R* 平面，然后主轴停转→快速退刀至初始平面

（续）

指　　令	动作图解	说　　明
G74		名称：攻左旋螺纹固定循环指令 指令格式：$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$G74X_Y_Z_R_P_F_K_; 动作说明：主轴停转状态下初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→主轴反转并按螺纹导程进给攻螺纹至深度 *Z* 点→主轴停转并暂停→主轴正转按螺纹导程进给退刀至 *R* 平面，然后主轴停转→快速退刀至初始平面

指令与动作分析：

1）指令中进给速度计算值为：*F*（mm/min）＝主轴转速 *n*（r/min）×螺纹导程 P_h（mm）。

2）指令动作 3 的下刀与动作 5 提刀移动均为指令中指定的进给速度。

3）孔底的动作 4——暂停，对加工的平稳性有极大的帮助。

4）攻螺纹指令期间，机床操作面板上的倍率调节旋钮无效。

5）攻螺纹完成提刀的动作 5，系统默认设置其进给速度等于下刀动作 3，但可以通过参数设置到动作 3 的 2000%。参数涉及 No. 5200#4（DOV）、No. 5201#3（OVU）和 No. 5381。

6）对于深度较大，或材料硬度与韧性较大，容易折断丝锥的加工，该指令还有一种类似于深孔钻孔指令动作的排屑式深孔攻螺纹固定循环指令，其指令格式为：

$$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}G84X_Y_Z_R_P_Q_F_K_;$$

通过系统参数 No. 5200#5（PCP）和 No. 5213 可设置为类似于 G73 和 G83 形式的排屑动作。

（4）攻螺纹循环指令 G84/G74 **应用技巧与禁忌**

1）要实现刚性攻螺纹，主轴上必须装有位置编码器，必要时可以保证主轴旋转与 *Z* 轴进给保持严格的传动比。数控加工中心一般均具有该功能。这时必须将参数 No. 5200#0（G84）设置为 0，且参数 No. 5210 设置为 0，确保 M29 有效。

2）对于具有主轴刚性攻螺纹功能的数控机床，如加工中心等，建议采用刚性攻螺纹，系统默认为 M 指令（M29）指定刚性攻螺纹方式，指令格式为：M29 S_。需要多次攻螺纹的较深螺孔，建议用刚性攻螺纹方式，防止螺纹乱扣。

3）对于不具有主轴刚性攻螺纹功能（即主轴未装位置编码器，无法准停）的数控机床，建议采用柔性攻螺纹，并选则具有轴向伸缩、螺距误差补偿功能的丝锥夹头，程序中不需用 M29 指令指定刚性攻螺纹模式。柔性攻螺纹方式下，编程进给速度可比理论进给速度低 5%～10%。

4）进给速度指定可以是每分种进给（G94）或每转进给（G95）。前者进给速度 *F*（mm/min）＝主轴转速 *n*（r/min）×螺纹导程 P_h（mm），后者进给速度 *F*（mm/r）＝螺纹导程 P_h（mm），参见编程示例。假设主轴速度 $n=200$r/min，螺纹导程 $P_h=1.25$mm。

分进给编程格式：

G94；	指定每分钟进给指令
G00 X120.0 Y100.0；	定位
M29 S200；	指定刚性攻螺纹方式
G74 Z-100.0 R-20.0 F250；	刚性攻螺纹（$F=200\times1.25$）

转进给编程格式：

G95；	指定每转进给指令
G00 X120.0 Y100.0；	定位
M29 S200；	指定刚性攻螺纹方式
G74 Z-100.0 R-20.0 F250；	刚性攻螺纹

5）选择合适的润滑形式，批量大时可考虑选用内冷却形式。

6）尽可能选用寿命较高的硬质合金刀具或涂层刀具。

（5）编程示例　图 3-88a 所示零件，使用 G84 指令编程加工图中 5 × M12 螺纹孔，假设螺纹底孔已完成加工，刀具为 M12 右旋丝锥。

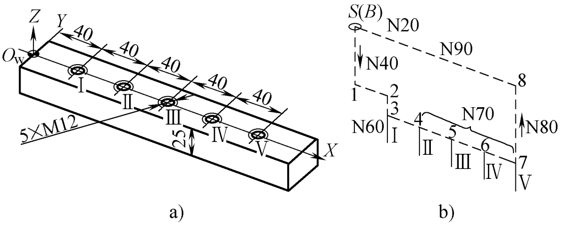


图 3-88　G84 指令应用示例

a）几何模型　b）刀具轨迹

查资料得 M12 粗牙螺纹的螺距 $P=1.75$mm，若主轴转速取 100r/min，则进给速度 $F=nP=100\times1.75$mm/min $=175$mm/min。参考程序如下：

O3880；	程序名称
N10 G40 G49 G80 G94；	程序初始化，手工换刀
N20 G90 G55 G00 X0. Y0 Z120.；	选择工件坐标系，快速移动至起始点 S
N30 M03 S100；	主轴正转，转速为 100r/min
N40 G43 Z30. H01 M08；	快速下刀至点 1，启动长度正补偿，开切削液
N50 M29 100；	指定刚性攻螺纹方式
N60 G99 G84 X40. Z-29. R5. P1000 F175 ；	指令 G84 指令，钻Ⅰ号孔，返回点 3
N70 G91 X40. K4；	增量坐标指定 4 次，分别定位至点 4～7，钻Ⅱ～Ⅴ号孔
N80 G90 G80 G00 Z120 M09；	取消固定循环指令，快速提刀至点 8，关切削液
N90 X0 Y0；	快速返回结束点 E
N100 M30；	程序结束，返回程序头

编程技巧分析：

1）程序起始点 S 与结束点 E 的坐标为（0，0，120），点 1 为初始平面高度（Z30），点 3 为参考平面高度（Z5），孔底深度在程序段 N60 中指定（Z-29）。

2）程序段 N50 指定刚性攻螺纹方式，孔的深度不大，可不用这一段程序，一次完成攻制。

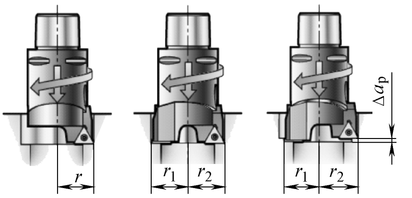
3）N60 程序段绝对坐标指定 G84 循环参数并钻Ⅰ号孔，N70 程序段增量坐标指定，程序段重复执行次数 K4 钻Ⅱ～Ⅴ号孔。

4）图 3-88b 所示为加工轨迹，供参考。

4. 镗孔加工循环指令 G85、G86/G88/G76 与 G89/G87

（1）镗孔加工孔几何特征与刀具分析　镗孔加工是对已存在的孔（铸、锻件上的预孔或钻、扩加工的孔）进一步加工，包括扩孔与保证孔的加工精度和表面质量。按加工目的不同分为粗镗、半精镗与精镗工序。粗镗刀常采用两刃或多刃镗刀，而精镗刀则多为单刃可调镗刀，如图 3-89、图 3-90 所示。镗孔加工可较好地纠正原孔轴线的垂直度误差，镗孔加工刀尖切削刃短，横向切削分力小且稳定，故镗孔加工的尺寸精度高（IT8～IT7），表面粗

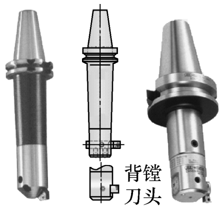
糙度值小（$Ra=1.6\sim0.8\mu m$）。镗孔加工可镗削通孔、阶梯孔等。镗孔加工的径向尺寸是通过调整刀尖至刀具回转中心的距离控制的，精镗孔时尽可能选用具有精确微调机构的镗刀，如图 3-90b 所示。



a) b) c)

图 3-89 单刃与多刃镗削

a）单刃镗削 b）双刃镗削 c）双刃阶梯镗削



a) b)

图 3-90 普通镗刀

a）整体式 b）可调式

普通的镗刀通常与刀柄做成一体，如图 3-90a 所示。这种刀具结构简单，成本稍低，但使用范围受到限制。另一种设计方案是模块化结构，图 3-91 为某品牌刀具的部分镗刀模块化组合示意图。

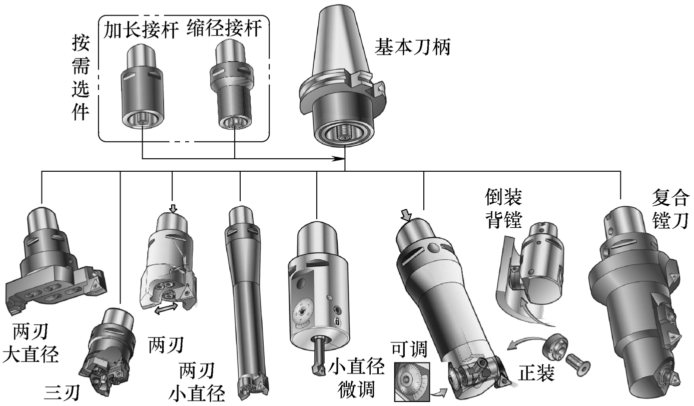


图 3-91 模块化镗刀示意图

作为经典的“钻—扩—铰”孔加工工艺，FANUC 0i 官方编程手册中并未明确指定铰孔加工指令，分析可见 G85 指令较为合适。数控机床上的铰孔属机铰范畴，机用铰刀的结构形式主要有整体式、机夹式和焊接式三大类，如图 3-92 所示。图 a 所示为铰孔加工示例，图 b、c、d 所示分别为整体式、机夹式和焊接式机用铰刀。铰刀相对于镗刀而言结构简单，尺寸控制方便，但其无法纠正孔的垂直度误差等位置误差。

（2）镗（铰）孔加工工艺问题分析 镗（铰）孔加工存在以下几个工艺问题：

1）铰刀属定尺寸刀具，分 H7、H8、H9 三种精度等级。铰孔加工余量不宜太大，一般取 0.1～0.4mm，铰孔加工的主轴转速可选同种材料钻孔转速的 2/3 左右，铰孔加工的进给速度比钻孔要大，通常为其 2～3 倍，加大进给速度实际上相当于加大了刃倾角，有利于表面粗糙度值的减小，必要时可用参数K_控制往复多次铰削。铰孔加工往复进给速度一般相等。值得注意的是，铰孔

a) b) c) d)

图 3-92 铰孔及铰刀

a）加工示例 b）整体式

c）机夹式 d）焊接式

加工类似于扩孔，它不能纠正孔的垂直度误差等，必要时还是考虑镗孔加工。

2）铸、锻件预孔的粗加工不得使用扩孔工艺，一般采用多刃镗刀粗镗或半精镗。对径向余量差异不大的场合，可采用切削刃均布的方案，如图 3-89b 所示。若两刃径向尺寸不等布置（$r_1 \neq r_2$），可进一步提高加工效率，但主轴功率消耗增大。若径向余量差异较大时，建议采用双刃阶梯镗削方案，如图 3-89c 所示。甚至采用图 3-91 中的三刃镗刀，并将刀片的径向尺寸错开，各刀头分层加工，使加工过程稳定。

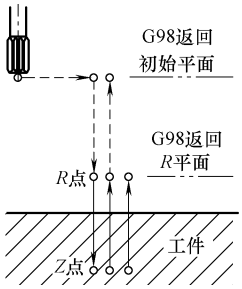
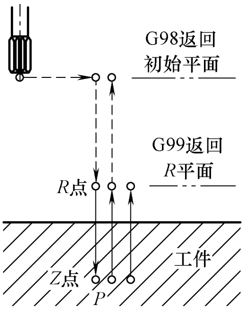
3）精镗加工尽可能选用具有微调机构的单刃镗刀，如图 3-90b 所示。尽量避免选用图 3-90a 所示的螺钉直接固定刀头的镗刀杆，退刀时避免与加工表面接触，如指令 G76 等。

4）镗削不通孔和阶梯孔时，刀头安装后的主偏角控制在 90°～95°，背镗加工时可采用刀头倒装的方式，不需准备专用镗杆，如图 3-90a 右图所示。

（3）指令 G85/ G89、G86/ G88 / G76 与 G87 动作分析

1）铰孔循环指令 G85/ G89 动作分析。见表 3-7。在 FANUC 0i 的官方编程手册中，G85/ G89 指令均被称为镗孔循环指令，但从循环动作看，其动作 5 的返回段依然为切削进给，因此不仅可用于镗孔加工，而且非常适合于铰孔加工，因此，称其为铰孔循环指令。

表 3-7　铰孔加工固定循环指令

指　　令	动 作 图 解	说　　明
G85		名称：通孔铰孔、镗孔循环指令。 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G85X_Y_Z_R_F_K_； 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→进给铰或镗孔至深度 *Z* 点→进给退刀至 *R* 平面→或快速退回初始平面。无动作 4 存在问题：动作 5 的退回动作仍然为切削，若刀具选择不当，返回动作可能造成表面质量差 应用：适合通孔铰孔与粗镗孔加工
G89		名称：阶梯孔铰孔、镗孔循环指令 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G89X_Y_Z_R_P_F_K_； 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→进给镗孔至深度 *Z* 点→暂停进给→进给退刀至 *R* 平面→快速退刀至初始平面 存在问题：同 G85 应用：适合于阶梯孔或不通孔铰孔、粗镗等加工，暂停时间操作主轴旋转一圈后可确保孔底加工质量

指令与动作分析：

① 该两指令的动作 3（*R* 点→*Z* 点）与动作 5（*Z* 点→*R* 点）均为切削加工（相当于 G01），与铰孔加工的动作要求相仿。

② 该两指令的差异主要在孔底动作 4，其中 G89 指令孔底有暂停指令 P_，适合于阶梯孔和不通孔的铰孔与粗镗加工。

③ 由于铰刀的法向前角较小，因此，铰孔加工的进给速度应适当提高，相当于增大了刃倾角，特别有利于提高表面加工质量。

④ 由于铰孔加工的进给速度较大，因此，必要时可上、下往复多次铰削，其实质是指令中参数 K 的应用。

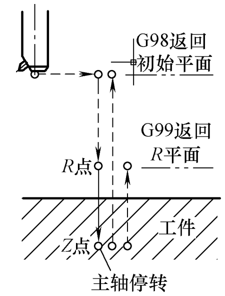
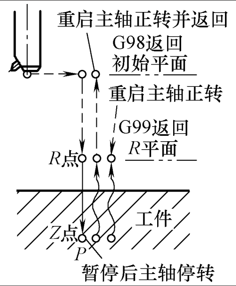
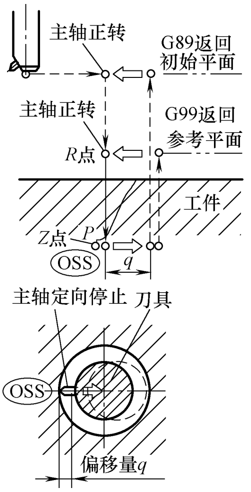
⑤ 此指令更适合于通孔铰孔加工，铰刀切削刃上、下伸出距离控制在切削刃长度的一半左右。

⑥ 通过控制参数 K（大于 1）可考虑将此指令用于孔的研磨加工。

⑦ 该指令由于动作 3 与动作 5 均为进给移动速度，用于镗孔时，若进给量 F_取得较大，则以去除材料为主，加工效率较高；而进给速度取得较小时，以加工质量为主，适合于半精镗或精镗加工。由于往复均需要切削加工，需注意刀头形状与参数的选择。

2）镗孔循环指令 G86 /G88/G76 动作分析。这三个指令分别可完成粗镗、半精镗与精镗孔加工，动作分析见表 3-8。

表 3-8　镗孔加工固定循环指令

指　　令	动作图解	说　　明
G86		名称：粗镗、半精镗循环指令 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G86X_Y_Z_R_F_K_; 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→进给镗孔至深度 *Z* 点→主轴停转→快速退刀至 *R* 平面或初始平面 存在问题：退回时会在工件表面划出一条直线 应用：适合于粗镗和半精镗孔加工
G88		名称：手动精镗循环回指令 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G88X_Y_Z_R_P_F_K_; 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→进给镗孔至深度 *Z* 点→暂停后主轴停转→手动退刀至 *R* 平面，然后重启主轴正转→或重启主轴正转并快速退刀至初始平面 存在问题：手动退刀影响加工效率，但可避免退刀时划伤工件表面 应用：适合于批量不大时的精镗孔加工，可镗削通孔、阶梯孔或不通孔
G76		名称：精镗循环指令 指令格式：$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$G76X_Y_Z_R_Q_P_F_K_; 动作说明：初始平面快速定位→快速下刀至 *R* 平面→进给镗孔至深度 *Z* 点→主轴定向停止，然后刀尖反方向移动距离 *q*→快速退刀至 *R* 平面，然后刀尖方向移动距离 *q*，主轴恢复正转→或从孔底直接快速退回至初始平面，然后刀尖方向移动距离 *q*，主轴恢复正转 存在问题：要求机床主轴具有主轴定向停止功能，否则该指令无效 应用：适合于批量生产的精镗孔加工，可镗削通孔、阶梯孔或不通孔

动作分析：

① G86 指令与 G81 指令的差异主要在提刀动作，前者是在停转状态下提刀。

② G86 指令镗阶梯孔或不通孔时，由于孔底无暂停动作，不能保证孔底的平面度。而 G88 与 G76 有孔底暂停，故可用于镗削通孔、阶梯孔与不通孔等。

③ 粗镗与半精镗的差异主要在于其加工余量的大小以及加工精度和表面粗糙度。就 G86 指令而言，显然粗、半精镗与指令动作无关，取决于切削用量的选取。但由于提刀时刀尖反方向无退刀，因此，加工面上会划出一道切削痕。实际上，这道划痕对配合件的影响并不大，但其加工效率高于指令 G88 和 G76 等优点使其仍可考虑用于精镗加工。

④ G88 指令退刀动作为手工操作，即加工至孔底后，主轴暂停然后停转，系统进入保持状态(相当于 M00 指令，各模态参数仍然保持)，切换至[手动]工作方式，手动沿刀尖反方向退刀适当距离，然后手动提刀至工件表面上适当距离（R 平面左右)。欲恢复程序继续执行，需切换至[自动]工作方式，按下[循环起动]按钮。若为 G99 指令，则主轴正转并返回 R 平面；若为 G98 指令，则主轴正转并返回初始平面。显然，这个指令由于人工干预退刀而避免了 G86 指令退刀的划痕，故其适合于孔的精镗加工，但加工效率低于 G76 指令。

⑤ 使用 G76 固定循环指令时，应注意检查主轴定向后刀尖的方向与要求是否相符，否则，可能出现损坏工件、刀具甚至机床的事故。

⑥ G76 指令整个执行过程自动执行，且不会在孔壁面留下划痕，当然属于精镗加工。但其在孔底有一个主轴定向停止动作，这个动作要求机床主轴有这个功能，否则，此指令无效。正是这一要求，限制了该指令的应用。

⑦ G76 指令的横向偏移量 q 为无符号数，若设置负值，系统忽略不执行。q 值设置要适当，确保刀杆以及提刀时的刀尖不碰撞孔壁。

3）背镗指令 G87 动作分析。常规的镗孔加工进给动作是向下的，孔径从上至下逐渐减小。若实际中由于工件结构的原因，无法安装成为这种形式，而出现了孔径从下到上逐渐减小的形式，这时必须采用背镗的工艺方法，如图 3-93 所示。G87 指令的动作分析见表 3-9。

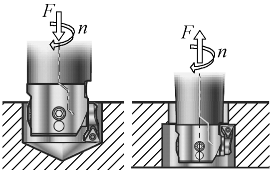
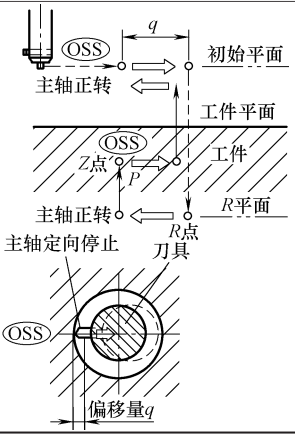


图 3-93　常规镗削与背镗

表 3-9　背（反）镗加工固定循环指令

指　令	动 作 图 解	说　明
G87		名称：背（反）镗循环指令 指令格式：{G90 / G91}G98G87X_Y_Z_R_Q_P_F_K_; 动作说明：初始平面快速定位，主轴定向停止，然后刀尖反方向移动距离 q→快速下刀至 R 平面，刀尖方向移动距离 q，然后主轴正转→Z 轴向上镗孔至深度 Z 点→主轴定向停止并暂停进刀，然后刀尖反方向移动距离 q→快速退刀至初始平面，然后刀尖方向移动距离 q，并且主轴恢复正转。动作 5 与动作 6 合并为动作 5 存在问题：要求机床主轴具有主轴定向停止功能，否则该指令无效 应用：适合于阶梯孔且装夹方式不便或不能从孔的大头进刀镗孔的工件

动作分析：

① G87 指令镗孔完成后只能返回初始平面，即指令中不得指定 G99。

② 该指令可认为是 G73 的变种与扩展。

③ 注意刀杆直径与镗孔直径的关系，确保刀具能够进入。

④ 该指令要求机床主轴具有定向停止功能。

（4）指令 G85/ G89、G86/ G88 / G76 与 G87 **应用技巧与禁忌**

1）学习孔加工固定循环指令要与相应的孔加工工艺建立联系。如 G81/G73/G83 对应孔窝、一般孔（即浅孔）、深孔加工，G82 对应锪孔及浅的阶梯孔，G85/G89 对应铰孔或通用的镗孔，G86/G88/G76 对应粗、半精镗、手动镗孔与自动镗孔等加工。

2）孔的加工不一定只能用固定循环指令，同一种几何特征应该有多种加工方法，实际中应根据具体情况选用。例如，阶梯孔加工可能的工艺方案有：

① 钻-锪工艺：完全采用孔加工固定循环指令（G81 钻-G82 锪）。

② 钻-锪复合：应用图 3-84d 所示的钻-锪复合刀具，仅用一个锪孔循环指令 G82 加工。

③ 钻-螺旋插补 + 圆弧插补铣削工艺：先钻孔，然后用螺旋加工沉孔，并用圆弧插补加工阶梯平面。

直径较大的通孔或阶梯孔，可以仅用螺旋加工指令粗铣、圆弧插补指令精铣的纯铣削方式加工。直径稍大的螺纹孔也可以采取铣削的方式完成。

3）注意，固定循环指令仅仅是编程手段，孔的加工工艺还是必需的，如表 3-2 推荐的精度要求 H9 的小孔必须采用钻-铰孔的工艺，若只用钻孔加工显然是不能满足要求的。

3.4.3 孔加工固定循环指令与应用注意事项

（1）固定循环的模态说明　以上固定循环指令都是模态指令，在未出现 G80 指令（取消固定循环）及 01 组的准备功能代码（G00/G01/G02/G03 等）之前一直有效，故在加工一组相同孔径的孔时，只需给出孔位置参数 X_、Y_的变化值，其余参数不必重复给出。一旦取消了固定循环，则 X_、Y_和 Z_值恢复到三轴联动的轮廓加工控制状态，固定循环指令的模态参数（如初始平面、R_、Q_、P_等）同时失效。

（2）孔位参数 X_Y_　调用固定循环指令时，如果没有 X_Y_值，孔中心位置为调用固定循环指令时刀位点所处的位置。如果在此位置不进行孔加工，而只是希望孔位置定位动作并保持孔加工固定循环指令的模态参数，则可在指令中使用 K0，调用孔加工参数。这时，若后续程序段中出现孔中心位置，即可按记忆的加工参数进行加工。

（3）孔底暂停　孔底暂停时间是阶梯孔、沉孔加工必要的参数之一，其必须保证主轴进给停止后轴必须旋转 1 圈以上，建议在 3 ~5 圈以上，但亦不需太多。

（4）参数 K_超过一次的用法　孔加工固定循环指令中的参数 K 必须在增量方式（G91）下使用，否则仅在同一位置重复钻孔。使用程序段重复调用参数 K 可使程序大大简化。

（5）初始平面与 *R* 平面高度的选择　初始平面高度必须保证其横向移动时不与工件、夹具等发生碰撞，而 *R* 平面高度则是多孔加工，孔位之间横向移动不出现碰撞。

（6）孔组加工　若工件表面条件许可，在进行孔组加工时，除最后一个孔外，中间孔的加工尽可能用 G99 返回至 *R* 平面进行孔位置的切换，这样可以有效地提高加工效率。

（7）固定循环指令使用时的注意事项　其规律如下：

1）初始平面由循环指令之前的其他程序指定；

2）固定循环指令不包含主轴起动指令，因此必须在循环指令之前起动主轴旋转；

3）与固定循环指令在同一个程序段中的辅助指令，当重复次数 K 大于 1 时，仅对第一个孔加工固定循环指令起作用，后面的循环指令不执行辅助指令，但辅助指令具有模态特性，仍然有效；

4）固定循环指令中指定刀具长度偏置时，在移动至 *R* 点的同时加长度偏置；

5）固定循环指令中指定 01 组的 G 代码时，固定循环被取消，这一点特别要引起注意；

6）固定循环中的暂停 P、退刀 Q 数据必须在循环指令程序段中指定，否则，不能作为模态数据保存；

7）固定循环指令与取消循环指令成对使用；

8）固定循环方式中，刀具偏置指令无效。

（8）钻孔加工　固定循环指令程序段中缺少数据 X、Y、Z、R 中的任意一个均不进行孔加工。

（9）暂停指令应用　使用控制主轴停转（G86）或正、反转切换（G74、G84）的固定循环指令时，如果孔位之间距离较短或从初始平面到 *R* 点平面的距离较短，则在进入孔加工动作之前，主轴可能达不到正常转速，这时，应在各加工孔动作之间插入暂停指令（G04），以延长时间。

（10）螺纹加工　螺纹加工固定循环指令（G74 和 G84）中，进给速度倍率固定在 100%。

3.4.4　固定循环指令综合应用示例

1. 程序段重复执行次数 K 及其应用

对于规则排布的阵列孔加工，合理地利用程序段重复加工次数 K，可显著简化程序。图 3-94 所示为一个漏水板零件，其主要特点是孔的数量多，假设孔板材料为 Q235，材料厚度 2 mm，试编写其孔的加工程序。

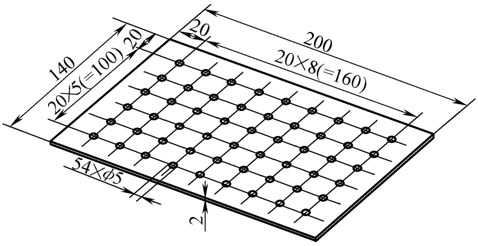


图 3-94　漏水板（1）

（1）工艺性分析　主要加工板上均布的 54 个 ϕ5mm 的通孔，由于其为漏水过滤孔板，孔的位置和尺寸精度要求不高，主要是孔的数量较多，如何简化程序是应考虑的主要问题。本例拟采用 G81 固定循环指令功能，利用指令中的参数 K 实现指令的重复执行进行多孔的加工。

（2）装夹方案　该零件为薄板型零件，尺寸较大，一般采用螺钉压板装夹，考虑到必须钻通孔，故装夹时在机床工作台上适当位置放置两块（或四块）等高的平行垫铁，定位夹紧位置选在 200mm 的长边处，必要时可以增加适当的辅助支承增加零件刚性。

（3）加工刀具的选择　本工件加工的工序仅为一道钻孔工序，且要求不高，故选用 ϕ5mm 麻花钻即可。

（4）加工工艺路线规划　本工件的孔加工要求不高，所以采取顺序加工的方式，缩短辅助时间，提高加工效率。具体的加工顺序如图 3-95 所示，采用了之字形的走刀路线。

（5）切削用量的选择　本工序的钻孔加工选取的切削用量为：n = 1000r/min，v_f = 40mm/min。

（6）工件坐标系及相关位置点的选择　考虑到零件的结构特点，将工件坐标系选在工件的上表面左上角，如图3-95、图3-96所示。程序起刀点 S 为（0，0，150），退刀点 E 与起刀点 S 重合。考虑到螺钉压板的装夹形式，选择安全平面的高度为50mm。其加工轨迹如图3-96所示。刀具路径为：起刀点 S→下刀至初始平面 a→快速定位至 b→G81指令依数字顺序钻54个孔→提刀至 d 点（参考平面）→快速返回结束点 E。

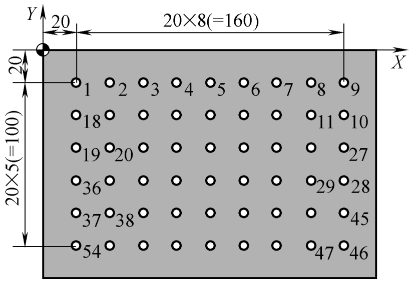


图3-95　加工顺序规划

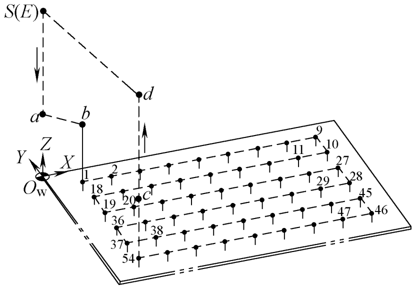


图3-96　刀具轨迹

（7）参考程序　采用固定循环加工多孔时的编程方法丰富，这里列举几例。

1）方法一：增量坐标编程，刀具轨迹参见图3-96，参考程序如下：

O3961;	程序名称
N10 G00 G017 G40 G49 G80 G90;	程序初始化
N20 G55 G00 X0 Y0 Z150.;	建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N30 S1000 M03;	主轴正转,转速为1000r/min
N40 G00 G43 Z50. H01 M08;	快速下刀至 a 点,执行刀具长度偏置,开切削液
N50 X20 Y-20.;	快速定位至 b 点
N60 G91 G99 G81 Z-6.5 R-47. F40 K1;	G81指令1号钻孔,返回参考平面
N70 X20. K8;	G81指令2～9号钻孔
N80 Y-20. K0;	G81指令10号钻孔
N90 X-20. K8;	G81指令1～18号钻孔
N100 Y-20. K1;	G81指令19号钻孔
N110 X20. K8;	G81指令20～27号钻孔
N120 Y-20. K1;	G81指令28号钻孔
N130 X-20. K8;	G81指令29～36号钻孔
N140 Y-20. K1;	G81指令37号钻孔
N150 X20. K8;	G81指令38～45号钻孔
N160 Y-20. K1;	G81指令46号钻孔
N170 X-20. K8;	G81指令47～54号钻孔
N180 G80 G90 G49 G00 Z50. M09;	取消固定循环和长度偏置等,提刀至 c 点,关切削液
N190 G00 Z150.;	快速退刀至 d 点
N200 X0 Y0;	快速返回退刀点 E
N210 M30;	程序结束,返回程序头

编程技巧分析：

① 采用 G55 指令建立工件坐标系，并启用了刀具长度偏置功能（程序段 N40）。一把刀具时可以不用，但可用于不同长度刀具的补偿，避免每次换刀改变工件坐标系 G55 存储器中的偏移值。

② G81 指令的初始平面高度为 50mm，*R* 平面高度为 3mm，孔底绝对坐标为 -3.5mm。

③ 注意 G81 指令的指定方法。先用一个程序段加工每行的第一个孔，然后用一个参数 K8 程序段重复钻 8 个孔，中途返回参考平面。

④ 注意采用增量坐标编程时固定循环指令中的 Z 和 R 高度参数的写法。

⑤ 注意程序段 N180 中取消了固定循环和刀具长度偏置，恢复了绝对坐标编程，并关闭了切削液。这几个指令都是与前面相关指令遥相呼应的。

⑥ 程序按独立程序编程思路编写。当孔的数量较多（主要是行数较多）时程序显得很长。

2）方法二：绝对坐标编程，并钻孔定位，然后用增量坐标编程钻多孔。刀具轨迹参见图 3-96，参考程序如下：

```
O3962;                                   程序名称
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;             程序初始化
N20 G55 G00 X0 Y0 Z150.;                 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N30 S1000 M03;                           主轴正转,转速为 1000r/min
N40 G00 G43 Z50. H01 M08;                快速下刀至 a 点,执行刀具长度偏置,开切削液
N50 X0 Y-20.;                            快速定位至 b 点
N60 G90 G99 G81 X20. Y-20. Z-3.5 R3. F40 K1;  绝对坐标编程,G81 指令 1 号钻孔,返回参考平面
N65 G91 X20. K8;                         增量坐标编程,G81 指令 2～9 号钻孔
N70 G90 X180. Y-40. K1;                  绝对坐标编程,G81 指令 10 号钻孔
N80 G91 X-20. K8;                        增量坐标编程,G81 指令 1～18 号钻孔
N90 G90 X20. Y-60. K1;                   绝对坐标编程,G81 指令 19 号钻孔
N100 G91 X20. K8;                        增量坐标编程,G81 指令 20～27 号钻孔
N110 G90 X180. Y-80. K1;                 绝对坐标编程,G81 指令 28 号钻孔
N120 G91 X-20. K8;                       增量坐标编程,G81 指令 29～36 号钻孔
N130 G90 X20. Y-100. K1;                 绝对坐标编程,G81 指令 37 号钻孔
N140 G91 X20. K8;                        增量坐标编程,G81 指令 38～45 号钻孔
N150 G90 X180. Y-120. K1;                绝对坐标编程,G81 指令 46 号钻孔
N160 G91 X-20. K8;                       增量坐标编程,G81 指令 47～54 号钻孔
N170 G80 G90 G49 G00 Z50. M09;           取消固定循环和长度偏置等,提刀至 c 点,关切削液
N180 G00 Z150.;                          快速提刀至 d 点
N190 X0 Y0;                              快速返回结束点 E
N200 M30;                                程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：G81 固定循环钻孔，绝对坐标指定钻第一个孔，接着增量坐标编程用程序段重复执行次数参数 K_指定后续孔的加工，其余与方法一程序相同。

孔的数量较多时，以上编程思路编写的程序显得较为繁琐，而子程序调用是简化编程的方法之一。以类似的图 3-97 为例，其孔的排布方式和数量有所变化。刀具轨迹参见图 3-98。

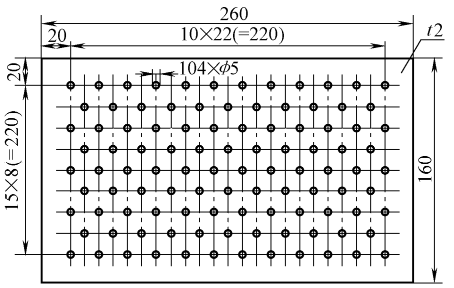


图 3-97 漏水板（2）

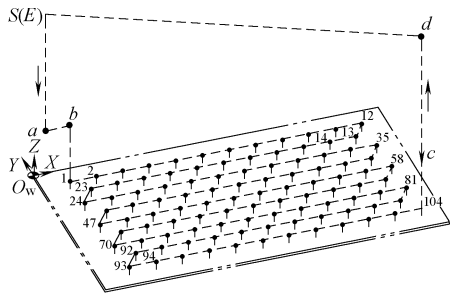


图 3-98 刀具轨迹

程序采用子程序调用的格式，1～23 号孔用子程序指定，通过 4 次调用子程序加工出 1～92号孔，93～104 号孔返回主程序加工。参考程序如下：

O3980；	程序名称
N10 G00 G017 G40 G49 G80 G90；	程序初始化
N20 G55 G00 X0 Y-20 Z150. ；	建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点 *S*
N30 S1000 M03；	主轴正转，转速为 1000r/min
N40 G00 G43 Z50. H01 M08；	快速下刀至 *a* 点，执行刀具长度偏置，开切削液
N50 M98 P43981；	4 次调用子程序 O3981，加工 1～92 号孔
N60 G90 K1；	加工 93 号孔
N70 G91 X20. K11；	加工 94～104 号孔
N80 G80 G90 G49 G00 Z50. M09；	取消固定循环和长度偏置等，提刀至 *c* 点，关切削液
N90 G00 Z150. ；	快速提刀至 *d* 点
N100 X0 Y0；	快速返回结束点 *E*
N110 M30；	程序结束，返回程序头
O3981；	子程序名称
N10 G90 G99 G81 X20. Z-3. 5 R3. F40 K1；	绝对坐标编程，G81 指令 1 号钻孔，返回参考平面
N20 G91 X20. K11；	增量坐标编程，参数 K11 指定钻 2～12 号孔
N30 X-10. Y-15. K1；	定位至 13 点，并钻孔
N40 X-20. K10；	参数 K10 指定钻 14～23 号孔
N50 X-10. Y-15. K0；	参数 K0 指定 G81 指令定位至 24 号孔
N60 M99；	子程序结束，返回主程序

编程技巧分析：

1）采用子程序调用方式编程可简化程序。

2）子程序用绝对坐标编程指定第 1 孔加工，并保存循环指令模态参数，然后用增量坐标编程，参数 K_指定第 1 行后续孔的加工。

3）子程序结束前用参数 K0 指定重复执行子程序的第 1 孔位置，并保持模态参数。注意，这一程序段禁止用 G00/G01 指定，否则退出固定循环指令。

4）本漏水板孔的排列中，最后一排孔只能单独加工，故安排在主程序中，参见程序段 N60 和 N70。

5）按该程序的程序框架，可方便地移植到其他规则排列孔群的加工中。

图 3-99 所示为阵列孔加工的另一示例。图 3-99a 为工件图，有 11 排 ϕ6mm 的通孔，孔

间距和行距均为 12mm，类圆形均布。假设工件坐标系取在左下角图示位置，参考程序如下，刀路轨迹如图 3-99b 所示。

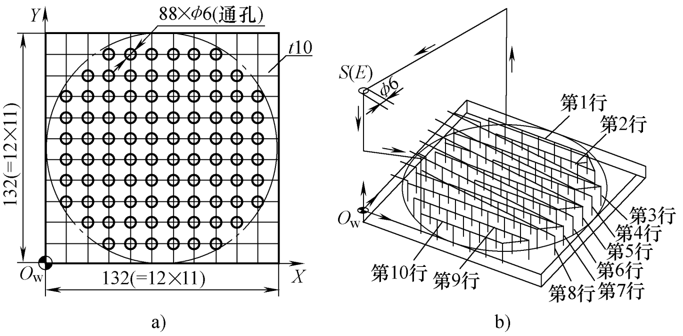


图 3-99　圆形均布的孔

a）工件图　b）刀路轨迹

```
O3990;                                        主程序名
N10 G90 G54 G00 X0 Y0 Z100. ;                 选择 G54 工件坐标系,快速定位至起始点
N20 S1000 M03;                                主轴正转,转速为 1000r/min
N30 G43 Z50. H01;                             快速下刀至初始平面,启动刀具长度偏置
N40 G99 G81 X36. Y12. Z-13. R3. F150;         指令 G81 循环参数,钻第 10 行左 1 孔
N50 G91 X12. K5;                              增量坐标参数 K 指定钻第 10 行其余 5 个孔
N60 X12. Y12. ;                               钻第 9 行右 1 孔
N70 X-12. K7;                                 增量坐标参数 K 指定钻第 9 行其余 7 个孔
N80 G90 G00 X0. Y36. Z5. ;                    快速定位至第 8 行左 1 孔左侧 12mm 处
N90 M98 P63991;                               调用 6 次子程序 O3991,钻第 8～3 行孔
N100 G90 G99 G81 X24. Y108. Z-13. R3. F150;   指令 G81 循环参数,钻第 2 行左 1 孔
N110 G91 X12. K7;                             增量坐标参数 K 指定钻第 2 行其余 7 个孔
N120 X-12. Y12. ;                             钻第 1 行右 1 孔
N130 X-12. K5;                                增量坐标参数 K 指定钻第 1 行其余 5 个孔
N140 G80 G00 G90 Z100. ;                      取消固定循环指令,快速提刀至起点高度
N150 X0 Y0;                                   快速返回起始点
N160 M30;                                     程序结束,返回程序头

O3991;                                        子程序名
N200 G90 G99 G81 X12 Z-13. R3. F150;          指令 G81 循环参数,钻各行左 1 孔
N210 G91 X12. K9;                             增量坐标参数 K 指定钻各行其余 7 个孔
N220 G00 X-120. Y12. Z5. ;                    快速定位上一行左 1 孔
N230 M99;                                     子程序结束,返回主程序
```

程序编程技巧分析：

1）采用子程序调用方式编程，简化程序。

2）子程序以行为单位，从左向右单向钻孔，子程序简短，但若每行孔的数量较多，会略降低加工效率。

3）上、下各两行未调用子程序，但采用了 U 形顺序钻孔，空行程最短。

2. 孔加工固定循环指令综合应用示例与分析

图 3-100 所示为加工工件，仅讨论其孔加工程序的编写。图中可见，其有三种尺寸的孔：6 个 ϕ10mm 的通孔、4 个 ϕ20mm 深度为 30mm 的沉孔和 3 个 ϕ95mm 的通孔。

（1）工艺分析

1）钻孔工艺分析及刀具选择：对于 ϕ10mm 的通孔，采用 ϕ10mm 的麻花钻直接钻出；对于 ϕ20mm 的不通孔，采用 ϕ20mm 键槽铣刀直接铣出；对于 ϕ95mm 的孔，由于直径较大，故采用钻→扩→镗工艺，为减少换刀次数，钻孔直接借用 ϕ10mm 麻花钻，但注意其属于深孔加工，扩孔拟采用螺旋插补铣削，其灵活性较大，选用刃长 125mm、直径 ϕ45mm 长型立铣刀，镗孔采用单刃可调镗刀。

2）加工工艺与切削用量：本零件的孔加工工艺及切削用量如下，图 3-101 为刀具配置图。

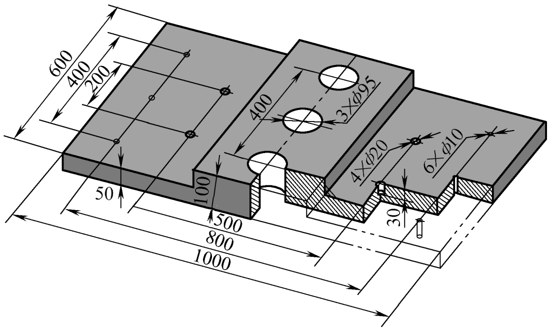


图 3-100 孔加工固定循环综合示例

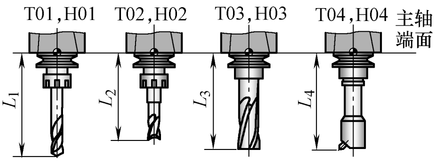


图 3-101 刀具配置图

工步一：钻 ϕ10mm 孔，G81 指令加工 1、2、3、4、5、6 号孔，G83 指令加工 11、12、13 号孔的预孔，刀具为 ϕ10mm 麻花钻（T01，H01），n = 300r/min，F = 80mm/min。

工步二：钻 ϕ20mm 不通孔，加工 7、8、9、10 号孔，刀具为 ϕ20mm 键槽铣刀（T02，H02），n = 200r/min，F = 80mm/min。

工步三：螺旋铣削扩孔至 ϕ94mm，螺旋扩孔加工 11、12、13 号孔，刀具为 ϕ45mm 长型立铣刀（T03，H03），采用逆铣方式，n = 300r/min，v_f = 160mm/min，轴向进给速度为 2mm/r。

工步四：镗 ϕ95mm 孔，G76 指令，镗孔加工 11、12、13 号孔，刀具为单刃镗刀（T04，H04），n = 400r/min，F = 50mm/min。若机床不具有主轴定向停止功能，则可考虑 G85 和 G88，甚至 G86 指令。

3）工件坐标系取在工件上表面后侧边几何中心处，如图 3-102 所示。起刀点 S 和结束点 E 重合，安全平面高度取 100mm，R 平面高度取孔表面 5mm。

（2）加工程序 刀具路径如图 3-102 所示。

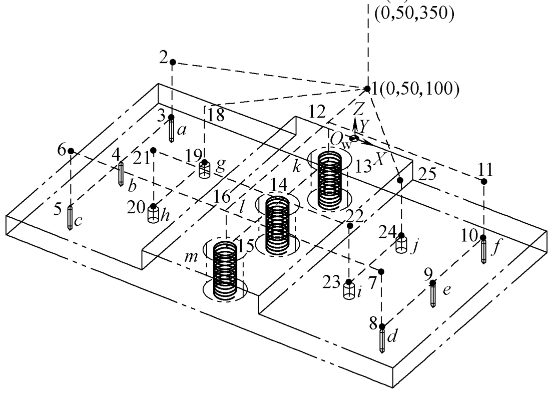


图 3-102 刀具轨迹图

O3102；	主程序名
N10 G40 G49 G80；	程序初始化
N20 G00 G91 G30 Z0；	返回换刀点
N30 T01 M06；	选择 T01 号刀并换刀至主轴
N40 G90 G55 G00 X0. Y50. Z350. ；	G55 建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点 S
N50 M03 S300；	主轴正转，转速为 300r/min
N60 G43 Z100. H01 M08；	快速下刀至点 1，启动长度偏置，开切削液
N70 G99 G81 X-400. Y-100. Z-105. R-45. F120 ；	定位至点 2，G81 指令钻孔 a，返回至点 3（点 R）
N80 Y-300. ；	定位至点 4，钻孔 b，返回至点 4（点 R）
N90 G98 Y-500. ；	定位至点 5，钻孔 c，返回至点 6（初始平面）
N100 G99 X400. ；	定位至点 7，钻孔 d，返回至点 8（点 R）
N110 Y-300. ；	定位至点 9，钻孔 e，返回至点 9（点 R）
N120 G98 Y-100. ；	定位至点 10，钻孔 f，返回至点 11（初始平面）
N130 G99 G83 X0 Y-100. Z-105. R5. Q10. ；	定位至点 12，G83 指令钻孔 k，返回点 13（点 R）
N140 Y-300. ；	定位至点 14，钻孔 l，返回至点 14（点 R）
N150 G98 Y-500. ；	定位至点 15，钻孔 m，返回至点 16（初始平面）
N160 G80 G00 X0 Y50. M09；	取消固定循环，快速定位至点 1，关切削液
N170 G49 G00 Z350. M05；	快速提刀至结束点 E，取消长度偏置，停转主轴
N180 G91 G30 Z0；	快速返回至换刀点
N190 T02 M06；	选择 T02 号刀，并换刀至主轴
N200 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ；	G55 建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点 S
N210 M03 S200；	主轴正转，转速为 200r/min
N220 G43 Z100. H02 M08；	快速下刀至点 1，启动长度偏置，开切削液
N230 G99 G82 X-250. Y-200. Z-80. R-45. P500 F80 ；	定位至点 18，G81 指令锪孔 g，返回至点 19（点 R）
N240 G98 Y-400. ；	定位至点 20，钻孔 h，返回至点 21（初始平面）
N250 G99 X250. ；	定位至点 22，钻孔 i，返回至点 23（点 R）
N260 G98 Y-200. T03；	定位至点 24，钻孔 j，返回至点 25，选择 T03 号刀
N270 G80 G00 X0 Y50. M09；	取消固定循环，快速定位至点 1，关切削液
N280 G49 G00 Z350. M05；	快速提刀至结束点 E，取消长度偏置，停转主轴
N290 G91 G30 Z0；	快速返回至换刀点
N300 M06；	换 T03 刀至主轴
N310 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ；	G55 建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点 S
N320 M03 S300；	主轴正转，转速为 300r/min
N330 G43 Z100. H03 T04 M08；	下刀至点 1，启动长度偏置，开切削液，选 T04 刀
N340 G00 Y-100. ；	快速定位至点 12
N350 Z5. ；	快速下刀至点 13
N360 M98 P3112；	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N370 G90 Y-300. ；	快速定位至点 14
N380 M98 P3112；	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N390 G90 Y-500. ；	快速定位至点 15
N400 M98 P3112；	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N410 G90 G00 Z100. M09；	快速提刀至点 16，关切削液
N420 G00 X0 Y50. ；	快速定位至点 1
N430 G49 G00 Z350. M05；	快速提刀至结束点 E，取消长度偏置，停转主轴

```
N440 G91 G30 Z0;                                  快速返回至换刀点
N450 M06;                                         换 T04 号刀至主轴
N460 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ;                  G55 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N470 M03 S500;                                    主轴正转,转速为 500r/min
N480 G90 G43 Z100. H04 T01 M08;                   下刀至点 1,启动长度偏置,开切削液,选 T01 刀
N490 G99 G76 X0 Y-100. Z-105. R5. Q1. P500 F50 ;  定位至点 12,G76 指令镗孔 g,返回点 13(点 R)
N500 Y-300. ;                                     定位至点 14,镗孔 l,返回点 14(点 R)
N510 G98 Y-500. ;                                 定位至点 15,镗孔 m,返回点 16(初始平面)
N520 G80 G00 X0 Y50 M09;                          取消固定循环,快速定位至点 1,关切削液
N530 G49 G00 Z350. M05;                           快速提刀至结束点 E,取消长度偏置,停转主轴
N540 G91 G30 Z0;                                  快速返回至换刀点
N550 M06;                                         换 T01 号刀至主轴,准备下一件加工
N560 M30;                                         程序结束,返回程序头

O3112;                                            子程序名
N10 G91 G00 X24. 5;                               快速定位至螺旋加工起点
N20 G03 I-24. 5 Z-5. F100;                        螺旋下刀至工件表面
N30 M98 P0513113;                                 调用 51 次子程序 O3113,螺旋粗加工 φ90 孔
N40 G91 G00 X-24. 5;                              快速返回至圆心
N50 G90 G00 Z5. ;                                 快速提刀至参考平面
N60 M99;                                          子程序结束,返回主程序

O3113;                                            子程序名
N10 G91 G03 I-24. 5 Z-2. F200;                    增量坐标螺旋加工一个整圆,下降 2mm
N20 M99;                                          子程序结束,返回主程序
```

（3）程序分析与说明

1）程序采用 G55 指令建立工件坐标系，程序执行与刀具当前位置无关。

2）程序中 N30 与 N190 为选刀与换刀在同一个程序段，指令清晰，但略费时。程序段 N260 与 N300 为 T03 号刀的选刀与换刀分开执行，加工效率略高，T04 号刀也是选刀与换刀分离。N480 选 T01 号刀，N550 将其换到主轴。若 N480 程序段中的 T01 改为 T00，则不选刀，这时执行完 N550 的换刀指令时，仅是将主轴上的刀具返回刀库中，主轴上不存在刀具了。

3）程序段 N490 的 G76 指令要求主轴具有准停功能，否则，使用 G88 等指令加工。

4）不同厂家的数控加工中心，其换刀指令略有差异，以厂家说明书为准。

5）数控铣床与加工中心的差异主要体现在刀库与自动换刀功能。数控铣床必须由人工换刀。一般用 M00 暂停程序执行手工换刀，换完刀后再次按下[循环起动]按钮继续执行。下面为与 O3102 对应的数控铣床加工程序框架，读者自行阅读比较。

```
O3102;                                            主程序名(程序执行前先将 T01 刀装至主轴)
N10 G40 G49 G80;                                  程序初始化
N40 G90 G55 G00 X0. Y50. Z350. ;                  G55 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N50 M03 S300;                                     主轴正转,转速为 300r/min
N60 G43 Z100. H01 M08;                            快速下刀至点 1,启动长度偏置,开切削液
N70 G99 G81 X-400. Y-100. Z-105. R-45. F120 ;     定位至点 2,G81 指令钻孔 a,返回至点 3(点 R)
```

N80 Y-300. ;	定位至点 4,钻孔 b,返回至点 4(点 R)
N90 G98 Y-500. ;	定位至点 5,钻孔 c,返回至点 6(初始平面)
N100 G99 X400. ;	定位至点 7,钻孔 d,返回至点 8(点 R)
N110 Y-300. ;	定位至点 9,钻孔 e,返回至点 9(点 R)
N120 G98 Y-100. ;	定位至点 10,钻孔 f,返回至点 11(初始平面)
N130 G99 G83 X0 Y-100. Z-105. R5. Q10. ;	定位至点 12,G83 指令钻孔 k,返回点 13(点 R)
N140 Y-300. ;	定位至点 14,钻孔 l,返回至点 14(点 R)
N150 G98 Y-500. ;	定位至点 15,钻孔 m,返回至点 16(初始平面)
N160 G80 G00 X0 Y50. M09;	取消固定循环,快速定位至点 1,关切削液
N170 G49 G00 Z350. M05;	快速提刀至结束点 E,取消长度偏置,停转主轴
N190 M00;	程序暂停,手动换 T02 号刀至主轴
N200 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ;	G55 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N210 M03 S200;	主轴正转,转速为 200r/min
N220 G43 Z100. H02 M08;	快速下刀至点 1,启动长度偏置,开切削液
N230 G99 G82 X-250. Y-200. Z-80. R-45. P500 F80 ;	定位至点 18,G81 指令锪孔 g,返回至点 19(点 R)
N240 G98 Y-400. ;	定位至点 20,钻孔 h,返回至点 21(初始平面)
N250 G99 X250. ;	定位至点 22,钻孔 i,返回至点 23(点 R)
N260 G98 Y-200. ;	定位至点 24,钻孔 j,返回至点 25,选择 T03 号刀
N270 G80 G00 X0 Y50. M09;	取消固定循环,快速定位至点 1,关切削液
N280 G49 G00 Z350. M05;	快速提刀至结束点 E,取消长度偏置,停转主轴
N300 M00;	手工换 T03 刀至主轴
N310 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ;	G55 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N320 M03 S300;	主轴正转,转速为 300r/min
N330 G43 Z100. H03 M08;	下刀至点 1,启动长度偏置,开切削液,选 T04 刀
N340 G00 Y-100. ;	快速定位至点 12
N350 Z5. ;	快速下刀至点 13
N360 M98 P3112;	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N370 G90 Y-300. ;	快速定位至点 14
N380 M98 P3112;	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N390 G90 Y-500. ;	快速定位至点 15
N400 M98 P3112;	调用子程序 O3112 螺旋粗铣内孔
N410 G90 G00 Z100. M09;	快速提刀至点 16,关切削液
N420 G00 X0 Y50. ;	快速定位至点 1
N430 G49 G00 Z350. M05;	快速提刀至结束点 E,取消长度偏置,停转主轴
N450 M00;	程序暂停,手工换 T04 号刀至主轴
N460 G90 G55 G00 X0. Y50 Z350. ;	G55 建立工件坐标系,刀具快速定位至起刀点 S
N470 M03 S500;	主轴正转,转速为 500r/min
N480 G90 G43 Z100. H04 M08;	下刀至点 1,启动长度偏置,开切削液,选 T01 刀
N490 G99 G88 X0 Y-100. Z-105. R5. P500 F50;	定位至点 12,G88 指令镗孔 g,返回点 13(点 R)
N500 Y-300. ;	定位至点 14,镗孔 l,返回点 14(点 R)
N510 G98 Y-500. ;	定位至点 15,镗孔 m,返回点 16(初始平面)
N520 G80 G00 X0 Y50 M09;	取消固定循环,快速定位至点 1,关切削液
N530 G49 G00 Z350. ;	快速提刀至结束点 E,取消长度偏置
N560 M30;	程序结束,返回程序头

程序编程技巧分析：

1）注意分析数控铣加工程序与加工中心程序的区别（仅改变了主程序，子程序未变），两程序的程序段序号未变，只有少量删减与修改。

2）对于不具有主轴准停功能的数控铣床 G76 指令无效，可考虑换为 G88 等指令，如程序段 N490 所示。

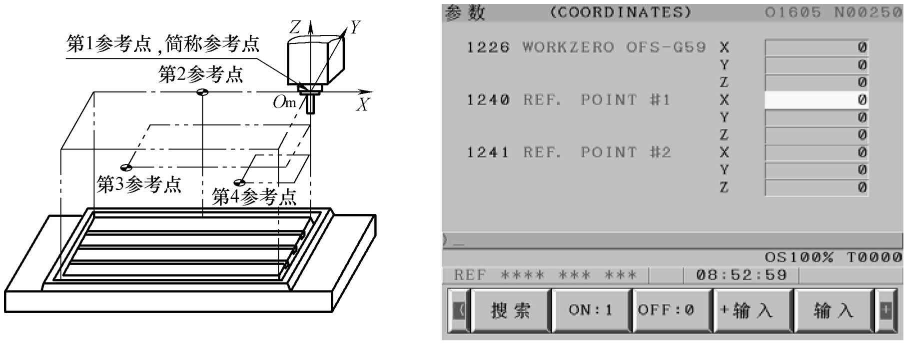
3.5 其他编程技巧

3.5.1 四个参考点的说明与设置

在 1.2.4 节中介绍机床坐标系时曾经提到机床参考点的概念。在 2.4.2 节中讨论过数控车床的参考点问题，这里进一步讨论数控铣床的机床参考点问题。

1. 参考点的概念

机床参考点是机床上一个特殊的固定点，FANUC 0i 系列数控铣床可以通过参数 No. 1240～1243 设置 4 个参考点，如图 3-103a 所示。其中，第 1 参考点简称为参考点。数控铣床常将第 1 参考点设置为与机床坐标系原点重合，利用数控机床的返回参考点操作或指令 G28 可以手动或自动返回该点，从而确定机床坐标系。这个过程可认为是数控机床开机后坐标系的初始化。



a） b）

图 3-103 参考点

a）参考点的概念 b）第 1、2 参考点设置画面

2. 参考点的应用技巧分析

机床参考点一般设置在各轴正方向的最大位置处（右后上角），但也不排除设置在其他特殊位置，如负方向的最大位置处（左前下角）等。第 1 参考点是数控机床建立工件坐标系的基准点，是其余参考点的基础，其数据设置在参数 No. 1240 中，由机床生产厂家确定，一般不作修改。

数控加工中心的换刀点设置，各厂家的机床有所差异，有的设置成与第 1 参考点重合，也有的设置在 X 轴中间（即工作台中后上角），这时操作者一般也不需要修改这个参数。

第 3、4 参考点可用于数控铣床的功能扩展，如工作台交换时的位置。若系统未用，则操作者这可将其作为某一固定的换刀点等。

参考点设置画面的进入：在 MDI 方式下，按下 SYSTEM 功能键→（必要时，按下［参数］软键）→按下［操作］软键→在输入缓冲区键入参数号（如 1240）→按下［搜索］软键。注意：参数修改必须先在设定画面中将参数写入允许设置为 1，修改参数后，必须记得将其设置回 0。

3. 返回参考点使用与操作技巧

（1）手动返回参考点操作　这是数控铣床操作的基础，是采用相对位置检测装置的数控铣床开机后首先必须进行的工作。具体参见后续的机床操作章节（4.1.2 节）。采用绝对位置检测装置的数控机床不需要该操作。

（2）G28 指令自动返回参考点　指令格式如下：

指令格式：G28 X_Y_Z_；

其中，X_Y_Z_为返回参考点时途径的中间点坐标值，可以是绝对或增量坐标编程。

（3）使用禁忌与注意事项

1）返回参考点的移动速度分两种情况：机床上电，返回机床参考点建立机床坐标系之前，其移动速度由参数 No. 1428 设定，其手动与自动返回参考点的速度相同，一般较慢；而返回参考点建立机床坐标系之后，手动返会参考点的移动速度不变，但自动返回参考点的速度由参数 No. 1420 设定，即快速移动 G00 的速度，该速度是可以倍率调节的。

2）为安全起见，执行 G28 指令前，应该清除刀具半径补偿和刀具长度偏置。

3）中间点的坐标值存储在 CNC 系统中，每次只存储 G28 程序段中指令轴的坐标值，其他轴使用以前存储过的坐标值，因此，开机第一次返回参考点时，不指定的坐标轴不执行返回参考点操作。

4）机床上电且未手动返回参考点之前，执行 G28 指令返回参考点各轴移动的方向与手动返回参考点相同（参数 No. 1006#5（ZMI_x）设定，一般为正方向），此时，中间点必须是刀具当前位置各轴的正向方向上的点。

（4）G28 指令自动返回参考点程序段格式使用技巧　有以下几种写法：

写法一：G90 G28 X100. Y80. Z60.；	刀具从当前位置点途径中间点(100,80,60)返回参考点
写法二：G91 G28 X0 Y0 Z0；	刀具从当前位置点直接返回参考点
写法三：G91 G28 X0 Y0 Z_；	刀具从当前位置先提刀 *Z* 至轴指定的高度，然后返回参考点
写法四：G91 G28 Z0； G28 X0 Y0；	刀具从当前位置先 *Z* 轴返回参考点，然后再 *X* 轴和 *Y* 轴返回参考点

写法一执行时必完成返回参考点后才保险；写法二返回时可能出现碰撞的干涉现象；写法三这种先提刀再返回的方式基本可避免碰撞现象；写法四是各轴分别动作，先 *Z* 轴提刀至参考点，然后 *X* 轴和 *Y* 轴返回参考点，这种方式最为安全，但动作时间略长，且需写两个程序段。

4. 返回第 2、3、4 参考点指令（G30）

指令格式：G30 P*n* X_Y_Z_；

其中，*n* = 2、3、4，表示第 2、3、4 参考点。

使用技巧：

1）若省略 P*n* 参数，则默认返回第 2 参考点，常用于加工中心的换刀点。

2）第 2、3、4 参考点的位置由参数 No. 1241 ~ 1243 设置。

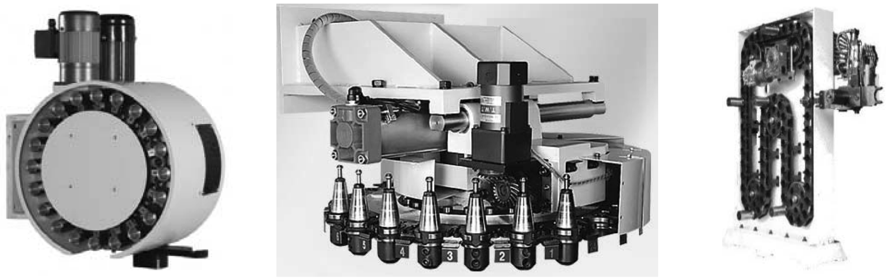
3）G30 指令必须在系统执行过手动返回参考点或自动返回参考点（G28）操作后才能生效。

4）G30 指令的动作与使用方法与 G28 指令相同。

3.5.2　加工中心的选刀与换刀编程技巧

1. 刀库的基本知识

加工中心与数控铣床最大的差异表现在刀库及其换刀装置。加工中心刀库的常见形式有：圆盘式刀库、斗笠式刀库和链式刀库。加工中心的换刀方式有机械手换刀与主轴换刀两种。圆盘式刀库和链式刀库一般采用机械手换刀，而斗笠式刀库一般采用主轴换刀，如图 3-104 所示。



a)　　　　　　b)　　　　　　c)

图 3-104　刀库的形式

a）圆盘式刀库　b）斗笠式刀库　c）链式刀库

刀库中刀具的选刀方式有顺序选刀与任意选刀两种，前者是将加工所需要的刀具按照预先确定的加工顺序依次安装在刀座中，换刀时，刀库按顺序转位，这种方式的控制及刀库运动简单，但灵活性差，近年来已经不常采用。后者主要是对刀库中的刀座进行编码，数控机床根据编码地址选刀，这种方式应用广泛。

任意选刀刀库按刀具编码方式的不同又分为固定地址换刀刀库和随机地址换刀刀库两类。固定地址刀库中刀具存放位置与刀座号相同且固定，从刀库中取出的刀具使用后仍还回到原来刀座，刀具号与刀座号始终一致，操作者可随时了解刀库中的装刀情况，可以根据刀具在刀库中的分布直接编写加工程序中的 T 指令。斗笠式刀库多采用固定地址选刀方式。随机地址刀库中存放刀具的刀号和刀座号，所以系统设置有一个刀具表，存放刀具号与对应的刀座号的关系。每次换刀动作后，刀具号放入刀座号的关系是变化的，但这种变化记忆在刀具表中，选刀指令可根据刀具表中刀具所对应的刀座号进行选刀（注意程序中的选刀指令仍然指令刀具号）。此外，操作者还能随时查询刀具表，必要时还能编辑和修改刀具表。圆盘式和链式刀库多采用随机地址选刀方式。

斗笠式刀库一般较小，可手工直接将刀具装入刀库中相应的刀座上。但大部分刀库的装刀是借助于主轴手工装刀，然后通过换刀指令将其装入刀库。装刀操作如下：

1）先执行 T×× M06，××为欲换的刀具号。

2）手动将××号刀具装到主轴上。

重复上面的操作，可以继续装刀。

加工中心的换刀过程一般包括两个动作——选刀与换刀，分别对应刀具指令 T××和换

刀指令 M06。选刀和换刀可以在一个程序段完成，也可以分散在不同的程序段完成，后者可以提高工作效率。

应当注意的是，加工中心的刀库一般由专业厂家生产，其选刀与换刀方式及指令格式取决于刀库厂家以及机床厂家的设计，因此，刀库的选刀与换刀方式必须以机床厂家的操作手册为准。

加工中心的换刀位置一般较为固定，如设置在 *Z* 轴的参考点位置（可用 G28 指令返回），也有专门设置的位置（一般用 G30 指令返回）。

2. 加工中心的选刀与换刀指令

（1）斗笠式刀库的换刀　多采用固定地址换刀方式，刀具号与刀座号是固定对应的，其换刀动作是依靠刀库的横向移动与主轴的上下移动实现换刀，简称为主轴换刀方式。由于其无换刀机械手，因此选刀动作不能在换刀动作之前预选。其换刀指令与选刀指令一般编写在同一个程序段，其指令格式如下：

M06 T× ×；

指令执行时，刀库首先将主轴上刀号对应的刀座转到换刀位置，并将主轴上的刀具换回刀座中，然后刀库又将指令中指定的刀具转到换刀位置，并换上主轴。

这种刀库，即使在执行 M06 的前面先执行 T× ×，也不能够预选刀，最终选刀的动作还是在执行 M06 时执行，如果 M06 前面没有 T× ×，则系统会报警。

换刀指令在程序中的编写格式如下：

```
G91 G28 Z0;          Z 轴返回换刀点
M06 T03;             主轴更换为 3 号刀
……
G91 G28 Z0;
M06 T04;             主轴更换为 4 号刀
……
G91 G28 Z0;
M06 T05;             主轴更换为 5 号刀
```

（2）圆盘式和链式刀库的换刀　其多采用随机地址换刀方式，刀具号与刀座号的对应关系是随机的，但其对应关系能够被数控系统记忆住。这种刀库的换刀是依靠机械手换刀。其指令与换刀的动作为：刀具指令 T× ×控制刀库的旋转，并将选中的刀具转至换刀工作位置，而换刀指令 M06 控制换刀机械手的动作，实现主轴刀具与刀库换刀位置处刀具的交换。其选刀指令与换刀指令可以在同一个程序段，也可以分开编写，选刀与换刀指令对应的动作也可以同时或分开动作。其指令格式如下：

T× × M06；

指令执行时，刀库首先将 T× ×刀转到换刀位置，然后机械手将刀库刀具与主轴刀具交换，实现 T× ×刀具换至主轴的目的。

随机地址换刀指令在程序中的编写格式有两种：

方法一：（选刀与换刀重合）

```
N10 G91 G30 Z10;     返回换刀点
N20 T02M06;          选 T02 号刀并将其换至主轴
```

方法二：（选刀与换刀分开）

```
N10 G01 Z_T02;                 加工过程中选 T02 号刀
……                             ……
N017 G30 Z10 M06;              返回参考点，换 T02 号刀
N018 G01 Z_T03;                加工过程中选 T03 号刀
……                             ……
```

阅读以上两种方法可以看出方法二将选刀动作与加工动作重叠，这样换刀时就不必选刀而直接换刀，提高了工作效率。

前文谈到，刀库的换刀指令与机床厂家有关，如有的刀库不仅要求 *Z* 轴必须返回换刀点，而且 *Y* 轴也必须返回换刀点，其程序格式如下：

```
T01;                           1 号刀转至换刀位置
G91 G28 Z0;                    Z 轴返回参考点
G30 Y0;                        Y 轴返回第 2 参考点
M06 T03;                       将 1 号刀换到主轴孔内,3 号刀转至换刀位置
……
G91 G28 Z0;
G30 Y0;
M06 T04;                       将 3 号刀换到主轴孔内,4 号刀转至换刀位置
```

在同一个程序段编写选刀与换刀指令时，不同厂家刀具的执行规则也可能有差异，如有的不管书写的先后顺序，均按先选刀、再换刀的规则执行。而有的则规定选刀指令必须在换刀指令执行之前编写，否则，其动作是先换刀、再选刀，如上面的程序所示。这种情况，若在 M06 指令执行前未编写选刀指令，则系统会报警。

技巧与禁忌：加工中心的换刀指令必须按机床厂家的编程说明书执行，否则可能不能正常换刀或出现意想不到的结果。

3.5.3　子程序调用简化编程

子程序调用能够简化编程，下面再通过几个示例进行分析。

图 3-105 所示为图 3-10 所示刀具轨迹的凸轮槽几何参数，槽宽 12mm（由刀具直径保证），槽深 15mm（图中未示出）。从图 3-10 中可见，其粗铣程序是逐层铣削至所需深度，然后在槽底再铣削一周保证槽底的平面度。以下列举了普通程序和主、子程序调用的程序结构供对比。

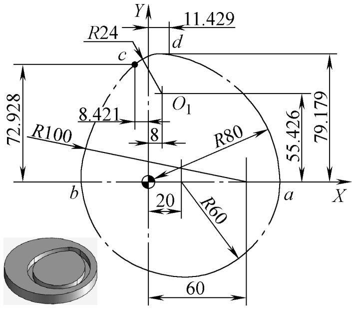


图 3-105　凸轮槽几何参数

```
O3105;(普通程序结构)
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;
N20 G00 G90 G55 X0. Y0.0 Z150.;
N30 S450 M03;
N40 G43 H01;
N50 X80.;
N60 Z5.;
N70 G01 Z1. F27.;
N80 G02 X-40. Z-3. R60.;
```

```
O3105;(主程序,主、子程序结构)
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;
N20 G00 G90 G55 X0. Y0.0 Z150.;
N30 S450 M03;
N40 G43 H01;
N50 X80.;
N60 Z3.;
N70 G01 Z0. F27.;
N75 M98 P53116;
```

```
N90 X-8.421 Y72.928 R100.;
N100 X11.429 Y79.179 R24.;
N110 X80. Y0. R80.;
N120 G02 X-40. Z-7 R60.;
N130 X-8.421 Y72.928 R100.;
N140 X11.429 Y79.179 R24.;
N150 X80. Y0. R80.;
N160 G02 X-40. Z-11. R60.;
N170 X-8.421 Y72.928 R100.;
N180 X11.429 Y79.179 R24.;
N190 X80. Y0. R80.;
N200 G02 X-40. Z-15. R60.;
N210 X-8.421 Y72.928 R100.;
N220 X11.429 Y79.179 R24.;
N230 X80. Y0. R80.;
N240 G02 X-40. Z-15. R60.;
N250 G01 Z5.;
N260 G49 G00 Z150.;
N270 X0. Y0.;
N280 M30;
```

```
N240 G02 X-40. Z-15. R60.;
N250 G01 Z3.;
N260 G49 G00 Z150.;
N270 X0. Y0.;
N280 M30;

O3116;(子程序)
N80 G91 G02 X-120. Z-3. R60.;
N90 G90 X-8.421 Y72.928 R100.;
N100 X11.429 Y79.179 R24.;
N110 X80. Y0. R80.;
```

编程技巧分析：

1）程序抽取出一个粗铣基本刀路（N80 ~ N110）作为子程序，并将螺旋下刀深度改为3mm，通过 5 次子程序调用下刀至 15mm，然后继续走一段深度不变的圆弧 *ab*，修整螺旋下刀处的螺旋面为平面，完成粗铣加工，简化了程序段数量。

2）主、子程序调用方式，可方便地修改每一刀螺旋下刀的深度（此处螺旋下刀深度为3mm，主程序调用次数，实现槽深度 15mm 加工），使程序调整更加方便。

再来看一个例子。图 3-30 所示的二维轮廓分层粗铣是常见的加工案例，普通编程方法需要编写多次重复的轮廓轨迹程序，3.3.5 节曾介绍利用刀具长度偏置功能简化编程的技巧，但其需要多次修改刀具长度偏置值，加工效率较低，适合单件生产。这里介绍用子程序调用的方法处理图 3-67 多次分层加工的示例，参考程序如下：

O3670;	主程序名称
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;	程序初始化
N20 G00 G90 G55 X12. Y-54. Z100.;	建立工件坐标系，刀具快速定位至起刀点 *S*
N30 S1000 M03;	主轴正转，转速为 1000r/min
N40 G43 Z5. H01 M08;	快速下刀至 *a* 点，执行刀具长度偏置，开切削液
N50 G01 Z0. F100.;	进给下刀至工件表面
N60 M98 P63681;	6 次调用子程序 O3981，垂直分层粗铣轮廓
N70 M00;	程序暂停，测量尺寸，计算并修改精铣半径补偿值
N80 G91 G00 Z2.;	提刀 2mm，抵消子程序下刀 2mm
N90 M98 P3681;	再次调用子程序精铣轮廓
N100 G49 G0 Z100. M09;	快速返回起始点 *E*
N110 M30;	程序结束，返回程序头

O3681;	子程序名称
N10 G91 G01 Z-2. F100.;	增量坐标编程,下刀2mm
N20 G90 G41 Y-42. F200. D01;	横向切削至 c 点,启动刀具半径左补偿
N30 G03 X0. Y-30. R12.;	圆弧切线切入至 d 点
N40 G01 X-30.;	从 d 点开始顺时针方向切削轮廓
N50 G02 X-40. Y-20. R10.;	
N60 G01 Y20.;	
N70 G02 X-30. Y30. R10.;	
N80 G01 X30.;	
N90 G02 X40. Y20. R10.;	
N100 G01 Y-20.;	
N110 G02 X30. Y-30. R10.;	
N120 G01 X-5.;	切削至 e 点,搭接量5mm,结束轮廓铣削
N130 G03 X-17. Y-42. R12.;	圆弧切线切切出至 f 点
N140 G40 G01 Y-54.;	直线切削至 g 点,取消刀具半径补偿
N150 G0 X12.;	横向快速移动至循环起点 b,准备下一次循环
N160 M99;	子程序结束,返回主程序

编程技巧分析:

1）本程序通过改变刀具半径补偿值实现轮廓的粗、精铣加工。该程序框架具有较好的移植性，能够方便地移植至其他二维轮廓加工编程上。

2）子程序第一段必须用增量坐标编程，确保每次循环能够下刀。

3）程序使用说明。首先，在偏置存储器 D01 中输入“刀具半径值 + 精铣单面余量”；然后，执行程序调用 6 次子程序粗铣轮廓，程序执行至 N70 时程序暂停，测量轮廓尺寸，计算精铣时刀具半径补偿值，并对 D01 中的值进行修改；再次按下 循环起动 按钮，执行程序，完成加工过程。

3.5.4 工件坐标系零点偏置的分析与应用

掌握工件坐标系的相关知识，是学习应用数控加工的基础，值得深入探讨。工件坐标系 G54 ~ G59 零点偏置应用技巧分析如下：

（1）工件坐标系 G54 ~ G59 零点偏置概念的回顾　在 3.1.3 节介绍过工件坐标系预置与选择指令 G54 ~ G59，图 3-8 中清楚地表示出工件坐标系存储器 G54 ~ G59 中存放的是工件坐标系相对于机床参考点的坐标值（即零点偏置值），这里重点注意一下 Z 坐标的零点偏置实际上控制着工件坐标系高度位置，修改其偏置值，具有刀具长度偏置类似的功能。

（2）工件坐标系 G54 ~ G59 零点偏置的应用技巧　依照以上原理，我们换一个角度来看一下 3.3.5 节介绍的用一个轮廓加工程序，通过改变工件坐标系 Z 轴的零点偏置实现图 3-30 所示垂直分层粗加工的功能。

以 3.3.5 节介绍的程序 O3670 和图 3-67 为基础，加工过程如下：

1）安装工件，按图 3-67 所示要求，以 G55 存储器对刀建立工件坐标系，假设如图 3-8b 所示。

2）设置刀具补偿值为 D01 = 6.500，长度偏置存储器 H01 = 0。

3）光标定位至图 3-8b 中 G55 存储器 Z 偏置值文本框处，按下［（操作）］软键，进入

工件坐标系操作画面，可看到画面下部的软键发生了变化，如图 3-106 所示。

4）在输入缓冲区键入 -2，按下［+输入］软键，则工件坐标系高度下降了 2mm，执行程序加工一次。

5）重复操作第 4）步 7 次，加工深度至 Z-14.，完成零件轮廓的垂直分层粗加工。

6）测量铣削轮廓，精确计算刀具半径补偿值，修改半径补偿存储器中的补偿值（D01≈6.000）。

7）维持深度不变的情况下，再一次执行程序，完成零件的精加工。

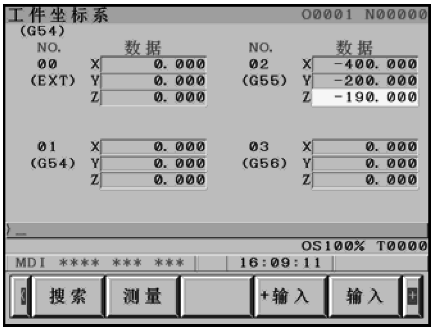


图 3-106　工件坐标系操作画面

提示：注意分析改变刀具长度偏置与改变工件坐标系零点偏置值的加工原理与方法，并与上一节子程序调用方法的加工原理进行比较。

3.5.5　附加工件坐标系 G54.1 的概念及应用分析

1. 附加工件坐标系 G54.1 的概念

在 FANUC 0i MC 系统中，除提供了 6 个工件坐标系 G54 ~ G59（标准工件坐标系）供用户使用外，还提供了 48 个附加工件坐标系 G54.1 P1 ~ P48（见图 3-107）供用户选择使用，大大扩展了用户的选择范围。

2. 附加工件坐标系 G54.1 的指令格式

附加工件坐标系中的零点偏置值可以在 MDI 面板上手工输入，也可以用 G10 程序输入，这里仅介绍前一种方式。指令格式为：

指令格式：G54.1 Pn；或 G54 Pn；

其中，Pn 为指定附件工件坐标系的代码，$n=1\sim48$。

例如：G54.1 P1…；调用附加工件坐标系 1。

图 3-107　附件工件坐标系画面 P01 ~ P04

3. 附加工件坐标系 G54.1 指令应用技巧

1）附加工件坐标系 G54.1 指令的应用与标准工件坐标系 G54 ~ G59 的使用方法相同。

2）附加工件坐标系一旦选择，直到另一个工件坐标系被选择之前一直有效。

3）在 G54.1 Pn 指令中，若没有指定 P 代码，则认为是附加工件坐标系 1（即 G54.1 P1）。

4）若 P 代码中的指定值不在指定的范围内，系统将报警。

3.5.6　局部坐标系 G52 的概念及应用分析

1. 局部坐标系 G52 的概念

在使用 G54 ~ G59 六个基本的工件坐标系指令时，为了方便编程，系统允许这六个坐标系的任意一个进一步设定若干子坐标系，这些子坐标系又称为局部坐标系，如图 3-108 所示。图中，O_m为机床坐标系原点（参考点）；O_{w1}为 G54 工件坐标系原点；O'_{w1}为 G54 坐标系的局部坐标系原点。

局部坐标系指令格式：

G52 X_Y_Z_；设定局部坐标系

……

G52 X0 Y0 Z0；取消局部坐标系

其中，X_Y_Z_为相应工件坐标系中的绝对坐标。

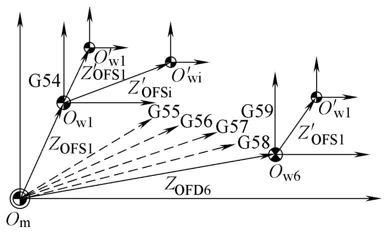


图 3-108 局部坐标系

2. 局部坐标系 G52 的应用技巧

1）局部坐标系原点由相应工件坐标的绝对坐标指定。

2）局部坐标系一旦指定生效，则程序中的绝对坐标值便是相对于局部坐标系的。

3）局部坐标系的设定不改变工件坐标系与机床坐标系。

4）当某一轴执行手动返回参考点操作后，该轴的局部坐标系零点偏置清零。其结果相当于 G52 α0（α 为返回参考点的坐标轴）。

5）按下 MDI 面板上的 RESET 键，一般不清除局部坐标系［除非参数 No. 3402#6（CLR）或参数 No. 1202#3（RLC）中任意一个设置为 1］。

6）当用 G92 指令设定工件坐标系时，若未指定所有轴的坐标值，则未指定坐标值的轴的局部坐标系保持不变。

7）G52 指令暂时清除刀具半径补偿中的偏置。

8）绝对值方式中，在 G52 程序段以后立即指定运动指令。

3. 局部坐标系 G52 的应用示例

图 3-109a 所示工件图，假设已完成六面体加工，现需铣上部 12mm 深的外轮廓，钻 4×ϕ11mm 孔和相应沉孔锪孔加工。为提高加工效率，拟每次安装 8 件加工，装夹布置方案如图 3-110b 所示。加工过程中用到的刀具包括：铣外轮廓的 T01 号刀（ϕ16mm 圆柱立式铣刀）、钻 4×ϕ11mm 孔的麻花钻 T02 号刀和锪 ϕ20mm 沉孔的机夹式平底立铣刀 T03 号刀。

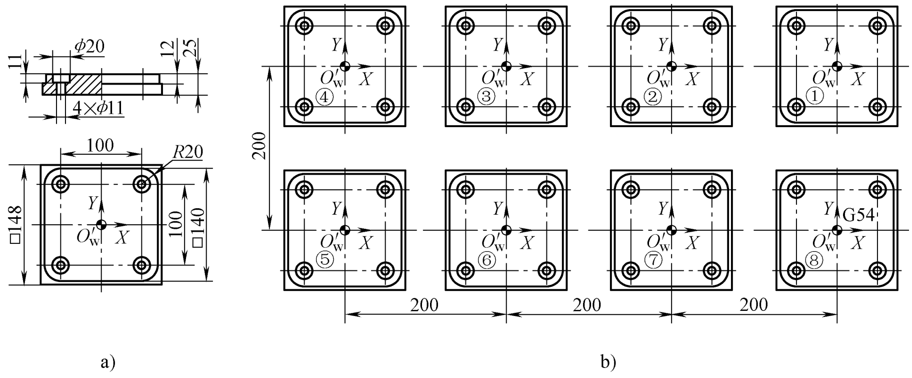


图 3-109 局部坐标系应用示例

a）工件图 b）装夹布置示意图

考虑到 8 个工件完全相同，仅仅是安装位置不同，因此，拟采用子程序调用程序框架，并用局部坐标系多次加工，基本工件坐标系选用 G54，定义在工件⑧上表面几何中心处，如图 3-109b 所示，工件加工顺序按数字①～⑧，参考程序如下：

```
O3109;                                  主程序名称
N10 G00 G17 G40 G49 G80 G90;            程序初始化
N20 G91 G28 Z0;                         返回换刀点
N30 T01 M06;                            换 T01 号刀至主轴
N40 G00 G90 G54 X0 Y200. Z100.;         选择 G54 工件坐标系,快速定位至件①局部坐标系上方
N50 S1200 M03;                          主轴正转,转速为 1200r/min
N60 G43 H01 M08;                        启动 T01 号刀具长度偏置,开切削液
N70 G52 X0 Y200. M98 P3119;             设定件①局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件①外廓
N80 G52 X-200. Y200. M98 P3119;         设定件②局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件②外廓
N90 G52 X-400. Y200. M98 P3119;         设定件③局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件③外廓
N100 G52 X-600. Y200. M98 P3119;        设定件④局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件④外廓
N110 G52 X-600. Y0 M98 P3119;           设定件⑤局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件⑤外廓
N120 G52 X-400. Y0 M98 P3119;           设定件⑥局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件⑥外廓
N130 G52 X-200. Y0 M98 P3119;           设定件⑦局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件⑦外廓
N140 G52 X0 Y0 M98 P3119;               设定件⑧局部坐标系,调用子程序 O3119 加工件⑧外廓
N150 G91 G28 Z0 M09;                    返回换刀点,关切削液
N160 T02 M06;                           换 T02 号刀至主轴
N170 G00 G90 G54 X0 Y200. Z100.;        选择 G54 工件坐标系,快速定位至件①局部坐标系上方
N180 S1000 M03;                         主轴正转,转速为 1000r/min
N190 G43 H02 M08;                       启动 T02 号刀具长度偏置,开切削液
N200 G98 G81 Z-30. R3. F100 K0;         指令 G81 循环参数
N210 M98 P3129;                         调用子程序 O3129,按①~⑧顺序钻 φ11 孔
N220 G80 G00 Z100 M09;                  取消固定循环,关切削液
N230 G91 G28 Z0;                        返回换刀点
N240 T03 M06;                           换 T03 号刀至主轴
N250 G00 G90 G54 X0 Y200. Z100.;        选择 G54 工件坐标系,快速定位至件①局部坐标系上方
N260 S600 M03;                          主轴正转,转速为 600r/min
N270 G43 H03 M08;                       启动 T03 号刀具长度偏置,开切削液
N280 G98 G82 Z-30. R3. P500 F80 K0;     指令 G82 循环参数
N290 M98 P3129;                         调用子程序 O3129,按①~⑧顺序锪 φ20 孔
N300 G80 G00 Z100 M09;                  取消固定循环,关切削液
N310 G91 G28 Z0;                        返回换刀点
N320 T01 M06;                           换 T01 到至主轴,准备下一次加工
N330 M30;                               程序结束,返回程序头

O3119;                                  子程序名称(铣外轮廓)
N10 G00 X97. Y70.;                      横向快速定位至铣外廓刀具轨迹起点
N20 Z5.;                                快速下刀至工件表面 5mm
N30 G01 Z-12. F100;                     进给下刀至深度 12mm
N40 G42 X82. F200. D01;                 启动 T01 刀具半径补偿
N50 X-50.;                              直线切线切入铣削上侧边
N60 G03 X-70. Y50. R20.;                铣削左上圆角
N70 G01 Y-50.;                          铣削左侧边
N80 G03 X-50. Y-70. R20.;               铣削左下圆角
N90 G01 X50.;                           铣削下侧边
```

```
N100 G03 X70. Y-50. R20.;              铣削右下圆角
N110 G01 Y50.;                         铣削右侧边
N120 G03 X50. Y70. R20.;               铣削右上圆角
N130 G01 X45.;                         铣削搭接量5mm
N140 G02 X30. Y85. R15.;               圆弧切线切出
N150 G01 G40 Y100.;                    取消刀具半径补偿
N160 G0 Z100.;                         快速提刀
N170 M99;                              子程序结束,返回主程序

O3129;                                 子程序名称(钻φ11孔)
N10 G52 X0 Y200. M98 P3139;            设定件①局部坐标系,调用子程序O3139钻件①的φ11孔
N20 G52 X-200. Y200. M98 P3139;        设定件②局部坐标系,调用子程序O3139钻件②的φ11孔
N30 G52 X-400. Y200. M98 P3139;        设定件③局部坐标系,调用子程序O3139钻件③的φ11孔
N40 G52 X-600. Y200. M98 P3139;        设定件④局部坐标系,调用子程序O3139钻件④的φ11孔
N50 G52 X-600. Y0 M98 P3139;           设定件⑤局部坐标系,调用子程序O3139钻件⑤的φ11孔
N60 G52 X-400. Y0 M98 P3139;           设定件⑥局部坐标系,调用子程序O3139钻件⑥的φ11孔
N70 G52 X-200. Y0 M98 P3139;           设定件⑦局部坐标系,调用子程序O3139钻件⑦的φ11孔
N80 G52 X0 Y0 M98 P3139;               设定件⑧局部坐标系,调用子程序O3139钻件⑧的φ11孔
N90 M99;                               子程序结束,返回主程序

O3139;                                 子程序名称(锪φ20沉孔)
N10 X50. Y50.;                         定位右上孔
N20 X-50.;                             定位左上孔
N30 Y-50.;                             定位右下孔
N40 X50.;                              定位左下孔
N50 G52 X0 Y0;                         取消局部坐标系
N60 M99;                               子程序结束,返回主程序
```

编程技巧分析：

1）采用主、子程序结构框架，主程序主要调用子程序，铣外廓、钻孔和锪孔分三个子程序编写，便于程序调试。

2）由于钻孔与锪孔位置参数相同，因此，采用了二次调用子程序方式（子程序嵌套）。

3）采用局部坐标系分别建立各件的子坐标系，简化程序编写。

4）由于孔深度较小，选用G81循环钻孔。锪孔需要保证底面平整，选用G82循环锪孔。

3.6 螺纹数控铣削加工

3.6.1 螺纹数控铣削的概念及优点

螺纹数控铣削是基于数控机床三轴联动，控制螺纹刀具按螺旋线运动，铣削出螺纹的一种加工方法。数控铣削加工仍属于成形铣削加工，其牙型断面尺寸靠刀具保证，但其不属于定尺寸刀具加工，其螺纹直径依靠数控程序控制刀具运动实现。

螺纹铣削加工具有以下优点：

1）加工效率高，加工成本低，特别是在中、大尺寸螺纹加工方面效果明显。

2）加工精度高，加工直径尺寸可调，方便加工控制，且加工表面质量好。

3）加工通用性好，特别是单齿机夹式螺纹铣刀，通用性不受螺距限制。工件形状不受结构、大小、内外螺纹等因素影响。

4）刀具寿命长，不存在丝攻折断取出困难的问题。

5）一把螺纹铣刀可铣削不同旋转方向、不同直径，甚至不同螺距的螺纹。

6）对退刀槽没有严格的要求，甚至可以不需要对刀槽。

7）加工高硬度难加工材料时，铣削螺纹比攻螺纹加工效果更好。

8）加工中、小尺寸的螺纹的效率不及攻螺纹加工。

总之，在数控加工技术普及的今天，螺纹铣削加工螺纹的工艺方法在批量生产中效果明显。

3.6.2　螺纹铣削刀具

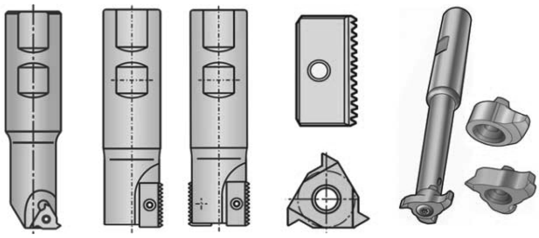
螺纹铣削刀具按结构形式不同分为整体式与机夹式两大类，如图 3-110 所示。焊接式螺纹铣刀不多见。图 3-110a 所示为整体式螺纹铣刀，其容屑槽有直槽与螺旋槽两种。图 3-110b 所示为机夹式螺纹铣刀，其刀片可以更换。

a)　　b)

图 3-110　螺纹铣刀结构示例

a）整体式　b）机夹式

注意，整体式螺纹铣刀与图 3-87 所示的丝锥不同。丝锥的刀齿是沿螺旋线分布的，而螺纹铣刀的刀齿是按圆周分布的，不存在螺旋升角。机夹式螺纹铣刀的刀片有多种，其与相应的刀杆构成了不同形式的螺纹铣刀，如图 3-111 所示。图 3-111a 所示为单齿单刃机夹式螺纹铣刀，结构类似于内螺纹车刀，刀片与螺纹车刀通用，一个螺旋运动只能加工一个齿，加工效率低，但不受螺距限制；图 3-111b 所示为多齿机夹式螺纹铣刀，有单刀片与多刀片形式，一个螺旋运动可加工多个齿，加工效率高，但只能加工固定螺距的螺纹，使用受一定限制；图 3-111c 所示为螺纹铣刀的刀片，上图为多齿刀片，下图为车刀螺纹刀片；图 3-111d 所示为铣槽镗杆与螺纹刀片，该刀杆装上螺纹刀片就成为了螺纹铣刀，其加工特点与图 3-111a 铣刀相似，但刀具旋转一圈可能有多个刀齿参与切削，可提高加工效率。



a)　　b)　　c)　　d)

图 3-111　机夹式螺纹铣刀

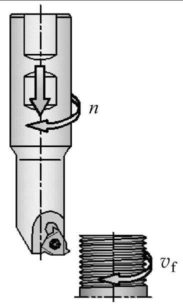
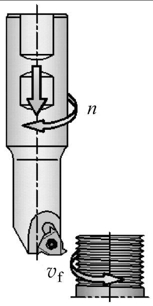
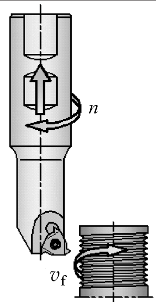
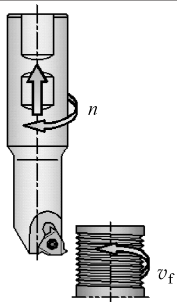
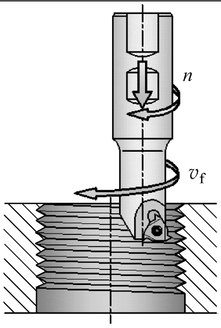
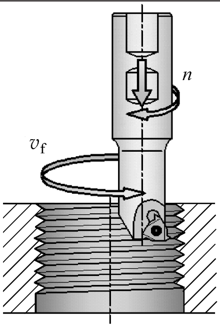
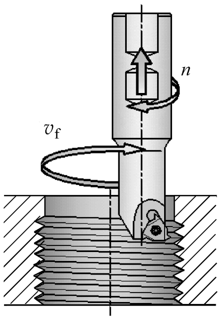
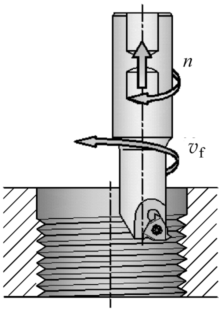
a）单齿单刃　b）多齿多刃　c）刀片　d）铣槽刀与螺纹刀片

3.6.3 螺纹铣削方法

1. 加工原理

螺纹铣削方法不同于车螺纹、攻螺纹或套螺纹，其加工原理是刀具的旋转运动为主运动（相当于自转），刀具旋转的同时还绕工件的轴线作螺旋进给运动（相当于公转），进而将螺纹铣出，见表 3-10。

表 3-10 螺纹铣削加工原理

外螺纹铣削	 右旋螺纹 顺时针进给，顺铣	 左旋螺纹 逆时针进给，逆铣	 右旋螺纹 逆时针进给，逆铣	 左旋螺纹 顺时针进给，顺铣
内螺纹铣削	 右旋螺纹 顺时针进给，逆铣	 左旋螺纹 逆时针进给，顺铣	 右旋螺纹 逆时针进给，顺铣	 左旋螺纹 顺时针进给，逆铣

显然，图中主轴转速 n 的大小和方向都不变，通过合理选择螺旋运动的旋向和轴向移动距离与方向是编程加工必须考虑的问题。

应用技巧：

1）数控铣床具有一个螺旋插补加工指令，可以用于螺纹铣削程序的编制。

2）注意数控程序给定的进给速度是刀具刀位点处的进给速度，对于螺纹铣削，实际上是刀具轴线在 XY 平面中移动的切线速度，其与且螺纹刀尖点的切削速度相差较大，常常需要换算。

3）螺纹铣削时，加工余量并不太大，建议尽可能采用顺铣方式铣削螺纹。

4）铣螺纹时，尽可能选择多齿螺纹铣刀（机夹式或整体式），且刀片宽度大于螺纹长度，这样只需铣削一圈即可。否则，必须铣削多圈螺纹。

2. 加工方法

按照以上介绍的螺纹铣削原理，选定合适的铣削刀具轨迹，即可得出螺纹铣削的加工方法。图 3-112 所示为右旋内螺纹，选用的刀具轨迹为逆时针进给，采用顺铣方式进行加工。

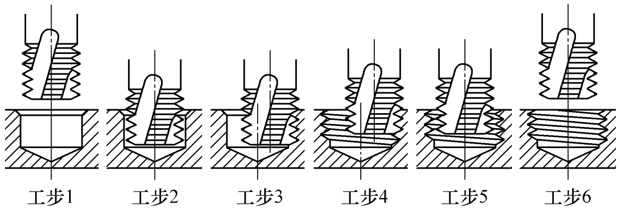


图 3-112　螺纹铣削方法

图 3-112 所示螺纹铣削加工步骤如下（假设已完成螺纹底孔加工）：

工步 1：刀具快速定位至螺纹孔上表面安全高度螺纹切削的起始点；

工步 2：快速下刀至铣削起始点高度；

工步 3：横向切入至螺纹直径处；

工步 4：整圈螺纹插补铣削一圈螺纹；

工步 5：横向切出；

工步 6：快速提刀至螺纹上表面安全高度，螺纹切削的结束点。

说明：

1）工步 3 和工步 5 分别为螺旋铣削的切入/切出方式，可参照 3.2.3 节所述的方式进行，即：圆弧切线切入/切出、直线直接切入/切出和直线切线切入/切出（仅适合于外螺纹铣削）。对于螺纹铣削而言，切入点处必须保证螺旋升角 ϕ 相等，也就是说圆弧切入实际上是螺旋圆弧切入，而直线切入并不是水平线切入。

2）对于螺旋线切线切入/切出加工方式，其切入/切出螺旋圆弧一般取 1/4 段螺旋圆弧，其圆弧半径 R 的取值范围为：刀具半径 $< R <$ 螺纹底孔半径（-0.5mm）。

3）切入段的进给速度适当降低（因为实际的切削厚度 a_e 很大，参见图 3-37 进行理解），切出段的速度允许适当提高。

3.6.4　螺纹铣削程序示例

螺纹铣削程序与刀具齿数有关，尽可能选择仅需一圈螺旋轨迹的刀具，如多齿机夹式铣刀或整体式螺纹铣刀。

1. 多齿铣刀单圈螺纹铣削示例

图 3-113 所示为一单圈螺纹铣削编程轨迹。加工轨迹为：起始点 S→快速下刀至 a 点→横向切削至 b 点，启动刀具半径左补偿→1/4 段螺旋圆弧切线切入至 c 点→螺旋铣削一圈至 d 点（螺距 1.5mm）→1/4 段螺旋圆弧切线切出至 e 点→快速移动至 f 点，取消刀具半径补偿→快速提刀至结束点 E。图中几个关键点的坐标分别为：a(0，0，-25.326)、b(1，-9，-25.326)、c(10，0，-25)、d(10，0，-23.5)、e(1，9，23.174)、f(0，0，23.174)。

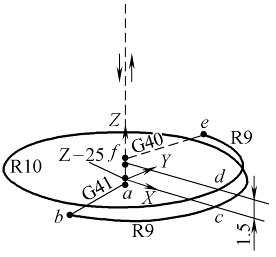


图 3-113　单圈螺纹铣削编程轨迹

加工数据为：螺纹 M20 × 1.5（大径 $D = 20$mm），螺纹深度 25mm。

刀具数据：硬质合金整体螺纹铣刀，螺纹铣刀直径 $d =$

16mm，螺距 $P=1.5\text{mm}$，切削刃长度 $L=35\text{mm}$，刃数 $Z=4$。切削速度 $v_c=70\text{m/min}$，$f_z=0.01\text{mm/Z}$。

工艺参数：螺纹底孔直径 $D_1=(20-1.08\times1.5)\text{mm}=18.38\text{mm}$，螺旋铣削方式为逆时针进给，顺铣。

工艺计算参数：

① 主轴转速计算： $n=\dfrac{1000v}{\pi d}=\dfrac{1000\times70}{3.14\times16}\text{r/min}=1393\text{r/min}\approx1400\text{r/min}$。

② 刀尖处进给速度： $v_f=f_zZn=0.01\times4\times1400\text{mm/min}=56\text{mm/min}$。

③ 刀心的进给速度： $v_f'=v_f\dfrac{D-d}{D}=56\times\dfrac{20-16}{20}\text{mm/min}=11\text{mm/min}$。

④ 切入/切出圆弧半径取： $r=9\text{mm}$。

⑤ 切入圆弧起点和切出圆弧终点与切入/切出点的高度差，计算原则为取 1/4 螺旋圆弧，切入/切出点处螺旋升角相等。其计算步骤与结果如下：

螺旋铣削的螺旋升角为： $\tan\phi=\dfrac{P}{\pi D}$

切入/切出圆弧的螺旋升角为： $\tan\phi=\dfrac{4\Delta Z}{2\pi r}$

由上两式相等的高度差为： $\Delta Z=\dfrac{Pr}{2D}=\dfrac{1.5\times8.7}{2\times20}\text{mm}=0.32625\text{mm}\approx0.326\text{mm}$

故点 b、e 的 Z 坐标分别为： $Z_b=-25.0\text{mm}+(-0.326)\text{mm}=-25.326\text{ mm}$

$Z_e=-25.0\text{mm}+1.5\text{mm}+0.326\text{mm}=-23.174\text{ mm}$

参考程序如下：

```
O3113;                                   程序名
N10 G90 G00 G54 X0 Y0 Z100.;             选择 G54 坐标系,快速定位至起始点 S
N20 G43 H10 Z-25.326 M03 S1400;          快速下刀至 a 点,启动刀具长度偏置
N30 G91 G01 G41 X1. Y-9. D01 F11;        增量坐标编程,进给移动至 b 点,启动刀具半径左补偿
N40 G03 X9. Y9. Z0.326 R9.;              螺旋圆弧切线切入至 c 点
N50 G03 Z1.5 I-10.;                      整圆螺旋切削一圈至 d 点,上升螺距 1.5mm
N60 G03 X-9. Y9. Z0.326 R9. F56;         螺旋圆弧切线切入至 e 点
N70 G90 G00 G40 X0 Y0;                   快速移动至 f 点,取消刀具半径补偿
N80 G49 G00 Z100.;                       快速提刀至 E 点,取消刀具长度偏置
N90 M30;                                 程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析：

1）选择切削刃长度大于螺纹深度的刀具，使得仅需编写一圈螺纹铣削程序即可，简化了编程，提高了加工效率。

2）程序启用了刀具半径补偿，使得螺纹加工的直径便于调整与控制。

3）程序采用 1/4 螺旋圆弧切线切入/切出，保证切入/切出点处接痕最小。

4）直线切入段（ab 段）就开始执行 G01 减速，安全可靠（按刀具半径补偿原理可分析出这一段实际走的长度很短，约 1.414mm，且已开始切入材料）。

5）1/4 螺旋圆弧切线切出段（N60 段）提高了切削速度，有利于加工效率的提高。

2. 单齿铣刀多圈螺纹铣削示例

对于单齿单刃螺纹铣刀而言，显然不能用上述单圈螺旋线的程序加工，下面再来看一个示例，刀具轨迹如图 3-114 所示。加工轨迹为：起始点 S→快速下刀至点 1，启动刀具长度偏置→快速下刀至点 2→横向直线直接切入至点 3，启动刀具半径补偿→多圈螺旋铣削至点 4→快速返回至点 5（完成第 1 次切削），取消刀具半径补偿→提刀至点 1→重复上述步骤从点 1 ~5 再次精铣一刀→快速提刀至点 E，程序结束。螺纹加工相关数据如下：

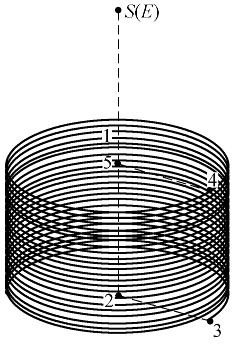


图 3-114　多圈螺纹编程轨迹

加工数据：M72 ×2 螺纹（D =72mm），螺纹深度 45mm。

刀具数据：单齿单刃机夹式螺纹铣刀，螺纹铣刀直径 d = 25mm，螺距 P = 1.5mm，切削速度 v_c = 100 ~ 140 m/min　f_z = 0.04 ~ 0.08 mm/Z。

工艺参数：螺纹底孔直径 D_1 = （70 − 1.08 ×2） mm = 69.84mm，螺旋铣削方式为逆时针进给，顺铣。

工艺参数计算：

① 主轴转速计算：　$n=\dfrac{1000v_c}{\pi d}=\dfrac{1000\times120}{3.14\times25}\text{r/min}=1528\text{r/min}\approx1500\ \text{r/min}$。

② 刀尖处进给速度：　$v_f=f_zZn=0.06\times1\times1500\text{mm/min}=90\text{mm/min}$。

③ 刀心的进给速度：　$v_f'=v_f\dfrac{D-d}{D}=90\times\dfrac{72-25}{72}\text{mm/min}=58.7\text{mm/min}\approx55\text{mm/min}$。

④ 由于为多螺旋线加工，故选用直线直接切入/切方式，不存在高度差计算问题。

参考程序如下：

O3114；	程序名
T01 M06；	选择 T01 号刀，换至主轴
G00 G90 G54 X0 Y0 Z100 S1500 M03；	选择 G54 坐标系，快速定位至起始点 S，起动主轴
G00 G43 Z10 H01 M08；	快速下刀至点 1，启动刀具长度偏置，开切削液
#1 = −45；	设置变量#1 等于孔深
Z#1；	快速下刀至点 2（孔底）
G41 G01 X36 F55 D01；	横向移动至点 3，启动刀具半径补偿 D01
N10 G91 G03 I-36 Z2；	增量坐标编程，螺旋铣削，螺距 2mm，粗铣螺纹
#1 = #1 + 2；	变量#1 加 2mm
IF [#1 LT 1] GOTO 10；	循环体判断，如果#1 小于 1，程序跳转至程序段 N10
G40 G00 G90 Y0 F100；	快速返回至点 5，取消刀具半径补偿
Z10；	提刀至点 1，准备精铣螺纹
#1 = −45；	重置变量#1 等于孔深
Z#1；	快速下刀至点 2（孔底）
G41 G01 X36 F55 D02；	横向移动至点 3，启动刀具半径补偿 D02
N20 G91 G03 I-36 Z2；	增量坐标编程，螺旋铣削，螺距 2mm，精铣螺纹
#1 = #1 + 2；	变量#1 加 2mm
IF [#1 LT 1] GOTO 20；	循环体判断，如果#1 小于 1，程序跳转至程序段 N20
G40 G00 G90 X0 F100；	快速返回至点 5，取消刀具半径补偿
G49 Z100 M09；	快速提刀至结束点 E

```
M05;                                   主轴停转
M30;                                   程序结束,返回程序头
```

编程技巧分析:

1）选择单齿单刃螺纹铣刀，刀具结构简单。

2）采用宏程序变量编程，适应多圈螺纹铣削，程序结构简单。

3）程序启用了刀具半径补偿，分别设置粗铣刀具半径补偿 D01 和精铣刀具半径补偿 D02，加工工艺合理，尺寸控制方便，使得螺纹加工的直径便于调整与控制。

4）由于多圈加工螺纹，故选用直线直接切入/切出，简化了计算与编程，仅在切入点 3 略有接痕，但不影响使用，切出点 4 已切出工件材料。

以上分别介绍了螺纹铣削的典型加工示例与程序，并以较为常见的米制螺纹为对象，其编程思想与参考程序可移植到其他螺纹的加工。

第4章　数控机床操作技巧与禁忌

4.1　数控机床操作基础

数控机床操作是数控加工编程技术的组成部分之一。首先，数控机床操作是数控加工的最终环节，是数控编程的最终体现。试想一下，没有数控加工的数控编程还有存在的价值吗？其次，准确地说没有得到数控加工机床验证的程序还不能称之为数控加工程序，学习数控加工编程的人士都知道，首件试切是数控加工编程的最后一道环节。第三，数控加工编程的很多概念与数控机床操作是分不开的，如工件坐标系指令G54～G59与G92（G50）、辅助指令M00与M01、程序段跳过符号“/”等。因此，要想学好数控加工编程技术，有必要学习数控机床操作知识。

虽然数控机床的工作原理是相同的，但不同的数控系统显示画面和操作面板相差较大。不同厂家数控机床的操作面板，其操作按键（或旋钮）的布置形式是不同的，甚至功能按键的数量也略有差异。本书以FANUC 0i数控系统为对象，以立式数控铣床XKA714和卧式数控车床CKA6150为基础进行介绍。

数控车床与数控铣床虽然加工原理有一定差异，但从数控加工操作的角度看，相通的部分还是较多的，因此，本书以数控铣床为主体，兼顾数控车床操作，介绍其不同的部分。

4.1.1　操作面板构成分析

数控机床的操作控制面板包括两部分——LCD/MDI操作面板与机床操作面板。前者是数控系统厂家提供的，相同型号的数控系统其面板完全相同。对后者而言，虽然数控系统厂家常提供标准的机床操作面板，但大部分机床厂家基于各种原因还是采用自行设计与制作的机床操作面板。不同厂家的数控机床，其面板设计与布局相差较大，甚至同一厂家，不同型号，或同一型号不同年代的产品都存在差异，因此，操作控制面板的实际布局以机床厂家的操作说明书为准。

图4-1所示为基于FANUC 0i MC数控系统的XKA714型立式数控铣床操作控制面板构成示例。图4-2所示为基于FANUC 0i Mate-TC数控系统的CKA6150型卧式数控车床的操作控制面板。图4-3为图4-1所示操作控制面板的机床操作控制面板部分布置图。

图4-1　XKA714型立式数控铣床操作控制面板构成示例

机床操作控制面板操作技巧说明：

1）按键的工作方式有两类：一类是开/关型，每按一次在开与关之间切换，有指示灯指定；另一类是点动型，按住有效，放开无效。

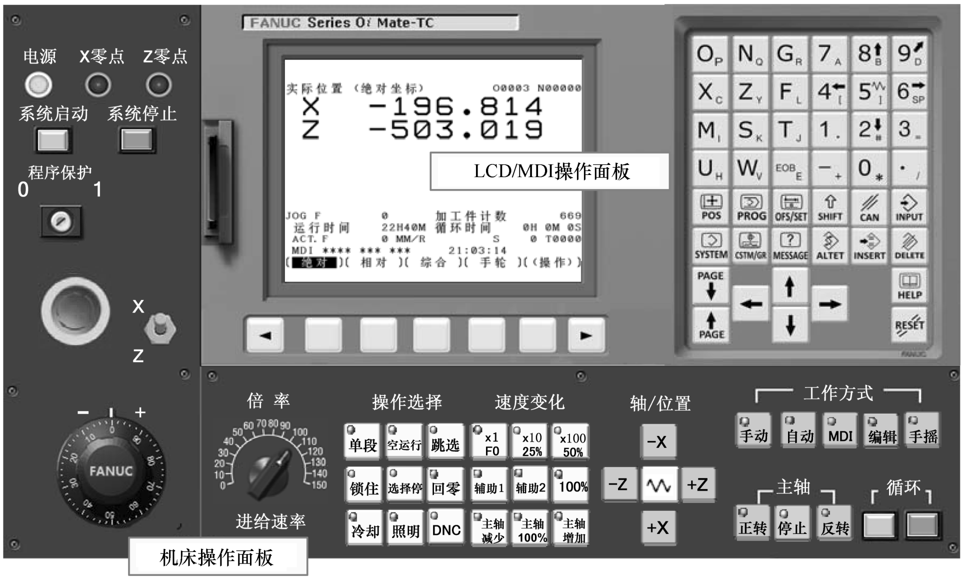


图 4-2 CKA6150 型卧式数控车床操作控制面板

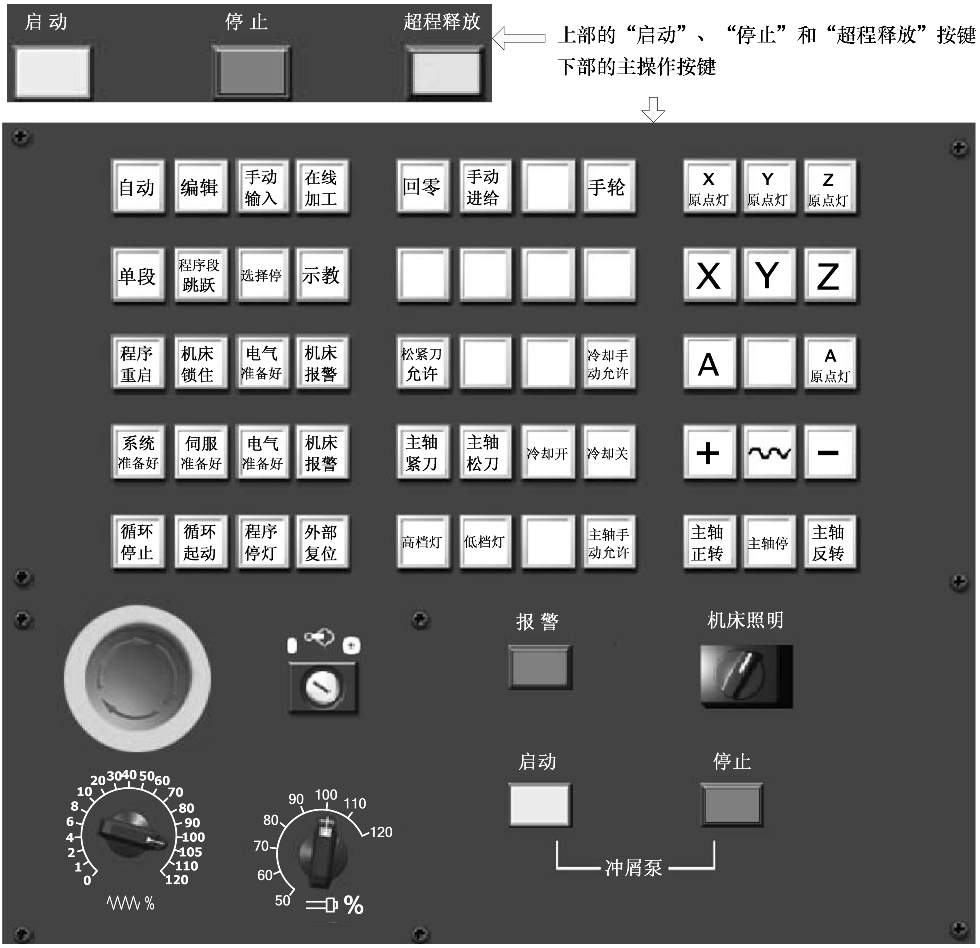


图 4-3 XKA714 型立式数控铣床操作控制面板的机床操作控制面板部分布置图

关于按键叙述如下。

开/关型按键：

① 开按键：按下按键，指示灯点亮，按键有效。

② 关按键：按下按键，指示灯熄灭，按键释放。

点动型按键

① 按住按键：指按住按键不放，执行相关操作。

② 按下按键：指按下按键后，会启动某项操作。这种按键不要求按住按键不放，即使释放按键，其操作仍然有效，直至启动的动作完成。

各按键的功能以按键上的说明提示为主。

2）旋钮一般有刻度指示说明，各刻度线有对应的功能提示或数值提示。大部分旋钮具有多个刻度线（挡位），这种旋钮又称为波段开关。两挡的旋钮功能类似于开/关按键，如机床保护锁等。

3）急停按钮是一种紧急情况下使用的停止按钮，其按下即可锁住为有效状态，释放时必须按箭头所示方向旋转后才会弹出。

4）脉冲发生器（又称手轮）是控制机床坐标轴手摇移动的装置，必须先选择控制轴和倍率，才能控制其每个脉冲的移动距离。每个脉冲的发出常凭借声音或手感，而移动的距离则以显示画面坐标值变化确定。

5）程序保护锁是一种必须插入钥匙才能旋转控制开/关的旋钮，且旋转至允许编辑状态时钥匙常无法拔下，必须旋转至程序保护状态才可以拔下。程序保护状态下只能运行程序，无法对其进行修改，包括各种参数等的修改。

6）MDI 操作面板上的按键需要与 LCD 操作画面的显示配合进行操作。

7）LCD 显示画面下部有一排操作软键，其功能是变化的，与操作画面下部显示的软键名称有关。

8）学习各按键、旋钮以及软键最好是在机床现场亲自动手，可达到事半功倍的效果。

图 4-2 所示各按键及旋钮的功能与操纵方法详述参见厂家操作说明书或参考文献［10］等。

图 4-3 所示各按键及旋钮的功能与操纵方法详述参见厂家操作说明书或参考文献［12］等。

对于同一系列数控系统的 MDI（手动数据输入）键盘，数控车削与数控铣削相差不大。图 4-4a 所示为 FANUC 0i MC 铣削数控系统的 MDI 操作面板布局及注释图，图 4-4b 所示为 FANUC 0i TC 车削数控系统的 MDI 操作面板布局。

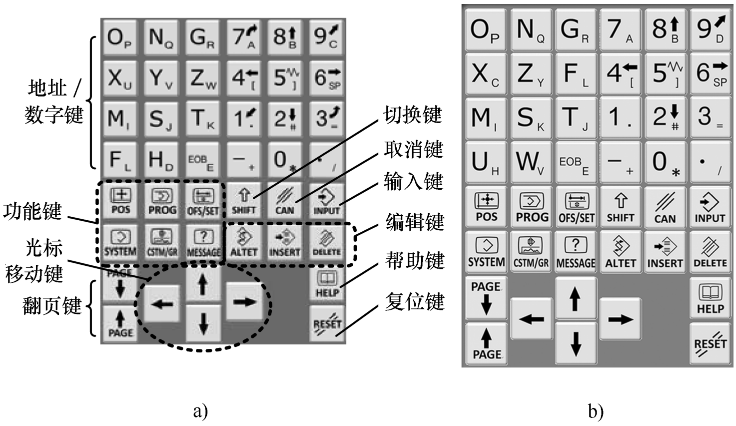


图 4-4　FANUC 0i 数控系统 MDI 单元键盘布局

a）铣削系统 MDI 键盘与注释　b）车削系统 MDI 键盘

4.1.2 机床的手动操作技巧

1. 数控机床的开机与关机

（1）开机 数控机床的开机操作步骤为

1）开机前检查机床，确保机床各部分状态良好。

2）机床通电。将机床电源开关置于“开”（或“ON”）位置（部分机床有电源指示灯）。

3）按下机床操作面板上的数控系统[启动]按键，启动数控系统。

4）系统启动后进入默认的坐标位置显示画面，若画面下部出现闪烁的“—— EMG —— ALM”报警提示，一般可按下[急停]按钮，再按下[RESET]键可消除报警。

（2）关机 操作步骤如下：

1）关机前，将主轴（*Z* 轴）移至适当位置（接近上止点），将工作台（*X* 轴和 *Y* 轴）移至中间位置。

2）按下机床操作面板上的[急停]按钮，切断机床强电控制部分。

3）按下数控系统[停止]按键，关闭数控系统。

4）将机床电源开关置于“关”（或 OFF）位置。必要时做好使用记录。

（3）开/关机操作技巧与禁忌

1）开/关机的步骤必须严格按顺序执行，尽可能不要直接用机床电源关机。

2）启动数控系统需要一个过程，其间严禁触碰机床操作控制面板上的任何按键等，否则可能出现意想不到的结果。

3）关于关机过程是否需要按下[急停]按钮的问题，部分厂家的机床操作说明书，甚至 FANUC 官方的操作说明书中并没有强制规定。但考虑到强电通断电时的电流冲击较大，易损坏数控系统的弱电控制系统，建议还是保留这一步。因此，开机时就会有释放[急停]按钮的操作。

4）关机时移动工作台至适当位置这一步尽可能不要省略，特别是工作台长期处于非中间位置，甚至工作重心偏出导轨支撑位置，容易导致机床的变形。这个过程是长期的，不易察觉。

5）关机后做好使用记录是良好的习惯。

2. 手动返回机床参考点操作

返回机床参考点是建立机床坐标系的需要，是否手动执行，与机床坐标轴位置检测装置的设计有关。对于装有绝对位置检测装置（绝对位置编码器）的数控机床，这一过程在数控系统启动后能够自动完成。而对于装有相对位置检测装置的数控系统，开机后的第一项操作便是手动返回机床参考点。

（1）手动返回机床参考点操作步骤 以 XKA714 型数控铣床为例，操作步骤如下：

1）按下机床操作面板上的[回零]按键，按键指示灯点亮，回零方式有效。

2）按下轴选择按键Z，按键指示灯点亮。

3）按下轴进给方向键，则 Z 轴移向参考点，返回参考点到位后，Z 原点灯点亮，Z 轴返回参考点成功。

4）接着按下轴选择按键Y，按键指示灯点亮。

5）按下轴进给方向键，则 Y 轴移向参考点，返回参考点后，Y 原点灯点亮，Y 轴返回参考点成功。

6）参照步骤 4）、5），执行 X 轴返回参考点操作。

（2）手动返回机床参考点操作技巧与说明

1）先返回 Z 轴，再返回 X、Y 轴是较为安全与良好的操作习惯。

2）是否完成返回参考点，应该以相应的指示灯为准，而不能观察工作台位置确定。

3）一般情况下，返回参考点后 G54 工件坐标系立即生效。

4）设置 G54 ~ G59 工件坐标系偏置、执行过机床锁住运行、机床急停操作后，均必须执行一次返回坐标参考点操作。

5）注意观察返回坐标参考点时工作台的移动过程，特别注意其接近参考点后先减速再停止的过程，加强对数控机床工作原理的理解。

6）开机后至返回参考点之前，手动快速操作无效，也无法执行 G28 指令之外的其他指令。

7）开机后至返回参考点之前，返回参考点各轴移动速度由参数 No. 1428 设定，一般不快，执行过返回参考点操作后再次返回参考点的速度一般执行 G00 的快速移动速度。

8）参数 No. 1002#0（JAX）可设定各轴单独返回还是同时返回参考点。默认设置为三轴单独返回参考点。

9）参数 No. 1006#5（ZMIx）可设定各轴返回参考点方向，默认设置为各轴正方向。因此，操作步骤的第 3）、5）步等均是按下轴进给方向键。

3. 数控机床主轴与刀具的手动操作

在机床操作面板上，均设置有主轴正转、主轴停止、主轴反转等主轴手动操作按键。有过机床操作经验的读者都知道，开机后未执行 S 指令之前，这些按键无法起动主轴，这是因为 S 指令是模态指令，开机默认为零。因此，有必要讨论主轴手动起动与停止操作。另外，数控机床的选刀以及数控加工中心的装刀等也常用到手动操作。

（1）机床主轴的手动起动与停止操作　操作步骤如下：

1）按下手动输入工作方式按键（有的机床直接称其为MDI按键），按键指示灯点亮，MDI 工作方式有效。

2）按下 MDI 面板上功能键PROG进入程序（MDI）画面。

3）在输入缓冲区键入程序段 S600 M03 和 M30，并用光标移动键将光标定位至程序头。

4）按下单段按键，按下循环起动按键，执行程序，主轴起动旋转。再次按循环起动按键，程序结束，主轴停转。

5）按下主轴手动允许按键（有的机床不需要这一操作，如上述的数控车床），指示灯

点亮，主轴手动操作有效。

6）此时，按下[主轴正转]、[主轴停止]、[主轴反转]按键即可起动、停止和反转主轴。

7）若要调整主轴手动起动的转速，可重复执行第2）、3）步。

（2）**主轴手动起动与停止操作技巧与分析**

1）主轴手动起动之前必须执行完手动返回参考点操作。

2）执行完第4)步即完成了向速度存储器输入速度值的过程，这是一个模态值，直至出现新的S指令之前一直有效，后续的手动起动主轴旋转便按这个速度值运行。

3）若执行过含有主轴速度指令S的加工程序后，可以省略第1）~4)步，直接执行第5)、6)步进行主轴的手动操作。

4）主轴手动起动的转速是一个随机值，取决于最后一次执行的主轴速度指令S的值，特别是执行过某一个数控加工程序时隐含输入的速度值。

5）主轴起动后的实际转速，可由机床操作面板上的主轴速度倍率调节旋钮或按键在一定范围内调节。

（3）数控车床的手动选刀与换刀　大部分数控机床的操作面板上无换刀按钮，必须在MDI方式下执行T指令完成。如欲将2号刀换至工作位置，其操作方法如下所述：

1）按[MDI]方式按键，按键指示灯亮，MDI工作方式有效。

2）按下MDI面板上功能键[PROG]进入程序（MDI）画面。

3）输入程序段“T0200”。

4）按[循环起动]按键，执行程序，完成2号刀的选刀与换刀。

（4）**手动选刀与换刀操作技巧与禁忌**

1）刀具指令格式以机床操作说明书为准，上述步骤3）是按T（2+2）格式输入。指令中只要确保刀具号正确即可。

2）若所选的刀具在工作位置，则刀架不动作。

3）数控加工中心的选刀与装刀时，也经常用到MDI方式下执行T指令选刀操作。注意，其刀具指令格式中仅包括刀具号。同时，其机床动作仅仅是刀库的旋转（圆盘式刀库），即将所选刀具旋转至换刀工作位置。

4. 机床坐标轴的手动操作

虽然数控机床是自动移动工作轴实现加工的，但机床调整过程还是离不开必要的手动操作。数控机床的手动操作包括按键和手轮两种，移动方式包括连续移动与增量移动。

（1）手动操纵进给　手动操作（又称JOG或点动操作等）是指用机床操作面板上的轴进给移动键手动控制工作轴连续移动。手动操作包括手动连续进给移动和手动快速移动两种。

1）手动连续进给移动。操作步骤如下：

① 按下[手动操作]工作方式按键，按键指示灯点亮，手动工作方式有效。

② 手动调节进给倍率旋钮，选择合适的移动速度倍率。

③ 按下欲移动坐标轴的轴选择按键（[X]、[Y]或[Z]），轴选择键指定灯点亮。

④ 按住轴进给方向按键[+]或[−]，则所选轴按正方向或负方向连续进给移动，释放按

键，则移动停止。

2）手动快速移动。操作步骤如下：

①～③操作方式同上。

④ 按住快速移动按键 的同时按住某一轴进给方向按键（+或-），则所选轴按正方向或负方向快速移动，释放轴进给方向按键，则移动停止，仅释放快速移动按键，则转为手动连续进给移动。

3）**手动操纵进给操作技巧与禁忌。如下所示：**

① 手动连续进给可用于人工操纵去切削加工、刀具位置移动与粗调等场合，手动快速移动可用于刀具快速移动，缩短辅助时间。两种进给方式均应用广泛。

② 手动连续进给速度可由进给倍率调节旋钮在一定范围内调节（各种机床的调节范围略有差异），进给倍率100%时的进给速度由参数 No. 1423 设定。

③ 手动快速移动速度有四挡速度倍率，即 F0、25%、50%、100%。其中，F0 时的移动速度由参数 No. 1421 设定，100%时的移动速度由参数 No. 1424 设定。

快速移动速度的调节方式与各厂家的设计有关，有的将这四挡倍率单独设置为四个按键——F0、25%、50%、100%进行调节（图 4-2），而有的是与进给速度倍率旋钮共用一个旋钮（图 4-3）。

④ 机床返回坐标参考点操作完成之前，手动快速移动操作无效，只能进行手动连续进给移动。

⑤ 禁止眼盯着显示画面的坐标变化手动进给操作，特别是手动快速进给操作，否则可能出现意想不到的后果。正确的操作方法是眼盯着工作台操作。

（2）手动增量进给　增量进给（又称为 INC 方式，是机床工作方式中的一种）能使工作轴按脉冲数量步进移动，每一个脉冲的步距可调。增量进给与手轮进给相似，只是脉冲发生的工具不同。因此，有的机床不设置手动增量进给，如图 4-3 所示的 XKA714 数控铣床就未设置该功能，其增量进给只能用手轮操作完成。这里以图 4-2 所示的数控车床为例介绍。

1）手动按键增量进给操作步骤如下：

① 按下手摇方式按键，按键指示灯点亮，手摇工作方式有效。

② 按下增量倍率调节按键×1、×10或×100，选择所需的移动倍率。

③ 每按下待移动工作轴及进给方向的按键一次，机床工作轴按指定轴指定方向移动一个步距。

手动增量进给操作技巧与禁忌如下所述：

① 默认情况下增量按键×1对应的步距为 0. 001mm。同理，增量按键×10和×100对应的步距等于最小输入增量的 10 倍和 100 倍，即 0. 01mm 和 0. 1mm。

② 增量进给主要用于对刀等需精确调整坐标轴位置的场合。一般先用手动快速进给或手动进给粗调，然后转为增量进给精调。

③ 增量进给的工作轴移动与手轮进给一样，可实现坐标轴工作位置的精确调整。

④ 增量进给，特别是小倍率操作时，肉眼无法判断出工作台的移动，因此，微量的调整有时是通过坐标位置显示画面上的坐标值变化来实现的。

2）手轮增量进给如下所述：

手轮进给（又称 HANDLE 进给）是指用手摇脉冲发生器发出的脉冲信号驱动工作轴的步进移动。手轮又称手摇脉冲发生器，可以独立设置或集成在操作面板上。图 4-5 所示为独立设置的手摇脉冲发生器。

旋转手摇脉冲发生器上的手轮，可以发出脉冲信号，手轮将 360°分成了 100 个刻度，每旋转一个刻度发出一个脉冲，驱动工作轴移动一个步距。每一个脉冲的最小移动步距默认设置是 0.001mm。每一个脉冲的移动步距可由倍率调节旋钮 ×1 、 ×10 、 ×100 进行调节，对应为 0.001mm、0.01mm、0.1mm。

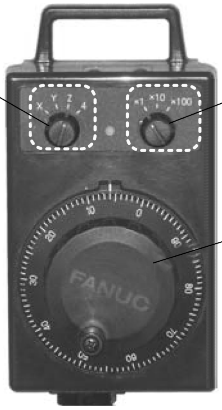


图 4-5　手摇脉冲发生器

手轮进给操作步骤如下：

① 按下 手轮 方式按键，按键指示灯点亮，手轮工作方式有效。

② 旋转手摇脉冲发生器上的轴选择旋钮，选择要移动的工作轴。

③ 旋转进给步距倍率旋钮，选择适当的移动倍率 ×1 、 ×10 、 ×100 。

④ 手摇脉冲发生器手轮驱动工作轴移动，手轮每转过一个刻度，工作轴移动一个步距，手轮正/反转，确定了工作轴移动方向的变化。

手轮进给操作技巧与禁忌：

1）摇动手轮时不必过于关注手轮上的刻度，更多的是要通过观察 LCD 显示屏上工作轴位置坐标值的变化和以手感为依据，必要时需要关注工作台上的刀具与工件。

2）手轮的正/反转与工作轴的正/负方向是对应的。

3）连续不断地旋转手轮，可驱动工作轴连续不断的增量移动，类似于手动连续移动进给。

4）连续旋转手轮时速度不宜太快，尽量不要跳跃式地旋转手轮。

4.1.3　机床报警与排除技巧

机床报警是机床操作过程中不可回避的异常情况，也是数控机床自诊断智能化的体现，正确处理机床报警是机床操作者的必备技能。

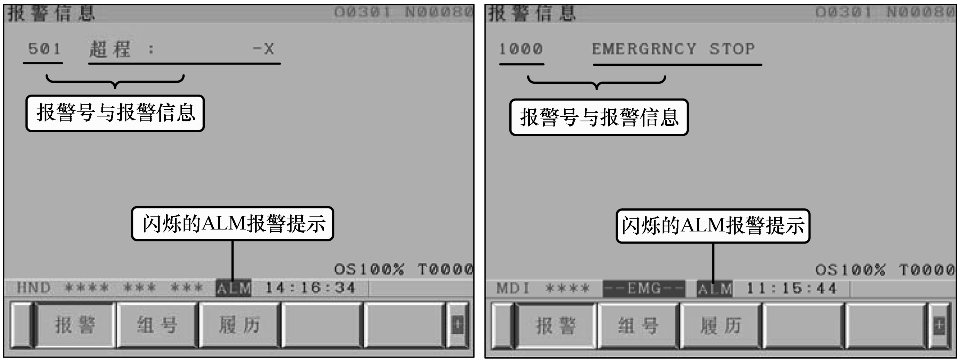
1. 报警画面分析

机床操作出现异常时，显示画面下部会产生闪烁的 ALM 报警提示，同时画面跳转至报警信息画面，画面上显示出报警号与简短的报警提示，如图 4-6 所示。

报警画面分析：

1）报警画面下部闪烁的 ALM 表示报警状态的存在，报警故障排除后即可消除。图 4-6b 所示为开机时显示的急停报警，只需旋转释放急停按钮，然后按下 MDI 键盘上的 RESET 键即可消除。

2）报警信息一般较为简短，详细的内容可根据报警号查阅数控系统官方的操作手册或



a)　　　b)

图 4-6　报警画面

a）*X* 轴超程报警画面　b）急停报警画面

维修手册，必要时可查阅机床厂家的操作手册。

3）部分报警信息可能是用英文显示的，因此，必要的英语基础也是必需的，当然，按报警号可在相关的操作手册上查到中文的报警信息内容。

4）报警故障的排除应具体处理，如修改部分系统参数时可能要求关一次机才能生效。

5）若存在报警信息的情况下，转到了其他画面时，只要闪烁的 ALM 存在，说明故障没有排除，这时，只要按下功能键 MESSAGE，再按下［报警］软键即可重回图 4-6 所示的报警信息画面。

6）故障排除后，一般需按 MDI 操作面板上的 RESET 键消除报警提示，退出报警状态。

7）若系统参数 No. 3111#7（NPA）设置为 1，则出现报警时不跳转到报警画面，仅仅是出现闪烁的 ALM 报警提示。

2. 报警信息的处理技巧

出现报警信息后，首先必须弄清故障的原因，然后再处理和排除故障。故障的现象和类型非常多。以下讨论故障的种类及其处理方法。

（1）不经任何处理直接复位的报警　这类报警一般仅是违背了数控机床的相关规则，系统拒绝接受或无法接受而产生的故障。这类报警信息最多，且处理方便。例如：073 号报警（程序号已使用）是因为创建程序时输入了一个系统内已经存在的程序号，显然，只需直接按 RESET 键消除报警，然后改变程序号重新创建新程序；010 号报警（不正确的 G 代码）是测试程序时可能出现的报警，一般在光标停止位置向后查找几个程序段即可找到问题，这类报警显然只需直接按 RESET 键消除报警，修改程序后继续运行；070 号报警（存储器无程序空间）是因为存储器的存储空间不够，这时，只需直接按 RESET 键消除报警，然后删除部分程序即可。

（2）不必急于处理的报警　这类报警相当于预报警，推迟一段时间处理，对机床的运行影响不大。例如：2000 号报警（RAIL’S LUBRICATION OIL LEVEL LOW）一般是润滑系统油液不足所致，这种情况并不一定要求立即停机加油。

（3）导致系统不能正常运行的报警　这类系统报警出现，机床停止运行，必须排除报警后才能继续工作。这类故障多属于系统硬件故障，常需专业人员处理。例如：笔者曾经遇到过的 437 号报警（nAXIS：CNV. OVERCURRENT POWER）和 431 号报警（Z AXIS：CNV. OVERLOAD），机床无法动作，经查阅资料判断是电源模块电流过载导致过热，机床无法动作。第二天开机，若机床运动部件不动，不出现报警，判断是刀轨阻力太大，分析原因是机床长时间未运行，加之润滑油供给不足所致，经调大供油量，并开机较长时间后再移动各坐标轴，并空载将各轴尽可能全程移动一段时间，使导轨润滑情况改善，报警消除。

（4）提示性质的报警　如系统参数修改时，必须在设定画面中将参数写入允许设置为 1，这时会出现 100 号报警（允许写入参数），这个报警无法用 RESET 键复位，报警状态下也不影响参数的设置。这个报警可以看成是一种提示，告知操作者修改参数完成后别忘了将参数写入允许设置为 0（系统参数保护状态）。

3. 报警信息处理技巧

报警的内容较多，涉及的知识面也较宽，需要一个逐渐积累的过程。但要想处理好报警信息，必须做好以下准备：

1）出现报警后，可按其报警号查阅数控系统和机床的相关说明书（包括操作说明书、维修说明书等），必要时可上网查询。

2）要多学习一些数控技术、数控机床的工作原理、数控编程的基本原理与法则等，这些知识对理解和处理报警是必需的。

3）必须具备一定的英语知识，因为某些报警并未译成中文。

4.1.4　急停操作与超程处理

1. 数控机床的急停操作与处理

急停（EMERGENCY STOP）是为应付紧急情况而设置的一个特殊功能，每台数控机床都设置有一个醒目的急停按钮，其一旦按下即自动锁住保持停止状态，同时显示画面出现急停报警信息——闪烁的“——EMG——ALM”报警提示。

释放急停按钮前必须先排除故障，然后按箭头所示方向旋转至按钮弹出位置，若报警提示未消除，可以按下 RESET 按键消除。

急停操作处理技巧：急停操作后必须重新执行返回参考点操作。

2. 其他可以执行急停的操作方式

（1）复位键 RESET　机床自动运行期间，按下 MDI 面板上的复位键 RESET，机床的全部操作均停止，且光标回到程序头，因此可以用此键完成紧急停机操作。复位键停机后不需要执行返回参考点操作，但有可能需要重新对刀。

（2）机床操作面板上的 循环停止 按键　机床自动运行期间，按下机床操作面板上的 循环停止 按键，机床暂时停止程序的运行，但各种模态参数等仍然保持，再次按下 循环起动 按键，程序从停止处继续执行下去。这种停止方式下机床的设置没有任何变化。由于这种停止保存有模态参数，所有该按键又称为“进给保持”按键。

（3）系统 停止 按键　机床自动运行期间，按下机床操作面板上的系统 停止 按键，可

以切断 CNC 系统的电源，当然也就停止了机床的运行。这种方式相当于停电故障，属于非正常停机，建议不要采用。

以上三种方式虽然可部分实现机床停止运行操作，但这些按键的操作均不如醒目的急停按钮快捷方便，所以仅作为急停操作的补充。

3. 数控机床的超程处理

（1）超程的概念　当机床试图移动到机床限位开关设定的行程终点之外时，由于碰到限位开关，机床减速并停止，并在显示画面中出现闪烁的“ALM”报警，出现 500～507 号报警和提示（不同的报警号，×轴×方向超程）。这时按下MESSAGE键可查找到报警信息，如图 4-6a 所示的 $-X$ 轴超程报警画面。

（2）超程处理技巧　需要手动操作移动工作台朝超程反方向移动一段距离，然后按下RESET键消除报警。不同的机床，超程处理方式略有差异，以机床操作说明书为准。例如：图 4-2 所示的数控车床，仅需手动移动或手轮操作直接移动坐标轴即可。而图 4-3 所示的数控铣床则需在按住超程释放按键的同时，手动或手轮操作移动坐标轴。

（3）超程处理禁忌　超程处理的轴和方向要清晰，严禁沿超程方向继续移动坐标轴。

4.2　程序调试技巧

合格的数控加工程序必须是能加工出合格零件的程序，因此，数控加工程序的最后一道环节是程序的上机检查、调试与首件试切。

4.2.1　上机床前的程序阅读与检查

数控加工程序上机床前，编程和操作人员必须阅读程序，初步检查其程序格式是否与机床所使用的数控系统相匹配。虽然编程人员在编程初期可能就在相关的编程软件上图形模拟仿真过程序，但上机前的程序阅读与检查还是必要的。

1. 程序阅读与格式检查

拿到一个程序准备数控加工时，首先必须了解这个程序是否适合所用机床数控系统的要求；其次，必须了解其数控程序的刀具轨迹如何，以便在机床上检查与测试程序时判断程序是否合格。

图 4-7 所示为 CIMCO Edit 软件仿真画面。该软件可编辑和修改数控程序文本，可实时显示刀具轨迹并可动态仿真加工轨迹。

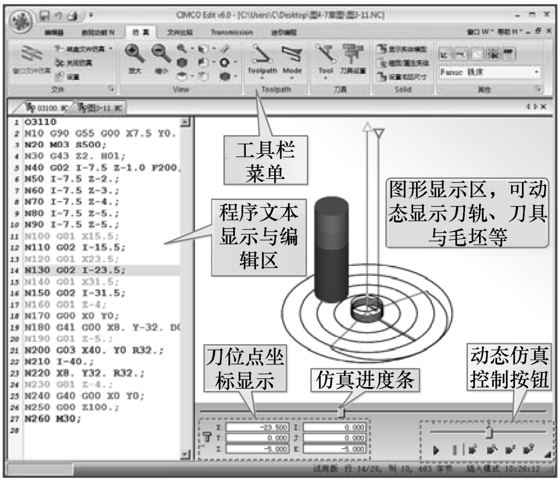


图 4-7　CIMCO Edit 软件仿真画面

程序阅读与检查的技巧与禁忌：

1）检查程序格式是否符合机床数控系统对程序及指令的格式要求。重点关注程序开始若干段以及结束前若干段，中间刀具运

动轨迹以图形仿真为主。

2）明确所使用的工件坐标系指令，必要时可修改为自己习惯使用的指令。

3）查阅主轴转速与进给速度值，必要时可以修改。

4）检查刀具半径补偿与长度补偿启动与取消程序段的设置位置及其补偿存储器编号。

5）在程序文本显示与编辑区逐段检查程序段，并观察右侧的刀具轨迹图形，对有疑问的地方认真阅读程序段格式，必要时修改相关指令。特别注意下刀轨迹的若干段的高度坐标是否需要修改。

6）注意程序结束前刀具的位置，如是否需要返回参考点程序段（依各人习惯而定）。

7）以上检查应该做一些必要的记录，以便在机床检查现场使用。

8）切记这种仿真的结果与实际机床加工的运行还是存在一定差异，不能直接用于加工，必须经过下面介绍的机床检查。仿真软件的控制器仅仅是通用型的，与具体使用机床的数控系统有一定差异，如虽然选择了“FANUC 铣床”控制器，但其仿真结果与具体 FANUC 系统（如 FANUC 0i MC）还是存在微小差异。

2. 虚拟仿真检查

除了上述的程序轨迹仿真，现在还有一些应用软件能够实现较为接近实际机床加工的仿真，如美国 CGTECH 公司开发的数控加工仿真软件 VERICUT，其对数控加工程序的仿真结果受到同行的好评。这款软件的控制器与具体的数控系统非常接近，并且允许用户进行修改，因此可进行虚拟仿真检查程序。图 4-8 所示为其仿真画面。限于篇幅，具体操作不作讨论。

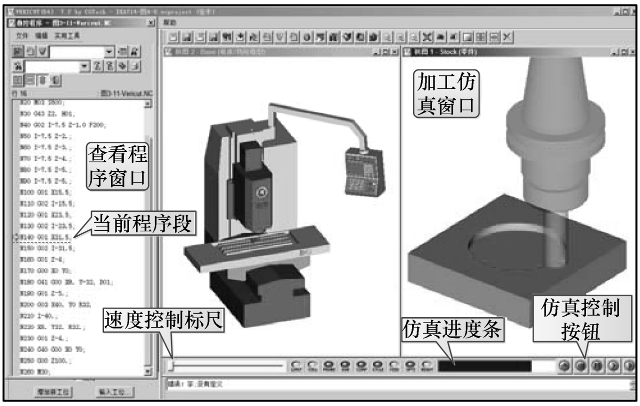


图 4-8 VERICUT 软件仿真画面

4.2.2 数控机床上的程序检查与调试

数控机床是按数控程序自动运行的，一旦程序有误，可能出现意想不到的后果，为此，数控机床亦提供了程序检查与调试的功能，这是程序编制至应用之前最后也是最有效的环节，不得忽视。机床上程序检查与调试的功能主要有以下几种：

1. 锁住运行

机床锁住运行时，数控系统停止向伺服电动机输出脉冲，各进给轴停止运动，但系统依然正常执行程序并进行指令分配，绝对坐标和相对坐标等均得到更新，操作者可以通过观察屏幕上的位置坐标变化等来检查指令编制是否正确。机床锁住运行主要用于检查数控程序和指令格式等，所以又称语法检查。

（1）机床锁住运行的操作步骤

1）在编辑方式下调出待运行的程序。

2）按下 自动 方式按键，按键指示灯亮，自动方式有效。按功能键 PROG 切换至合适

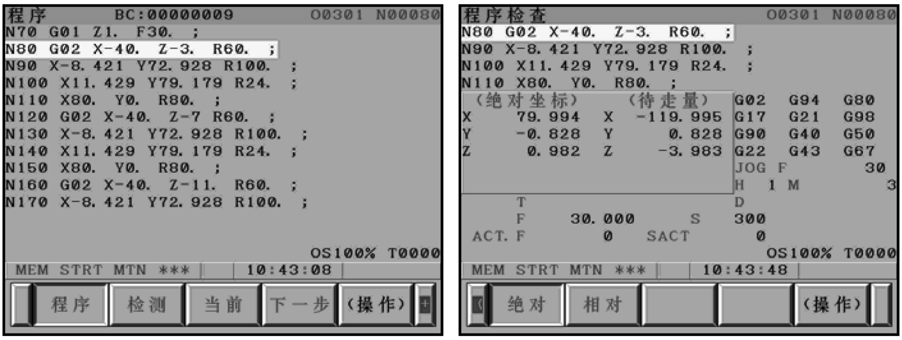
的程序显示画面。

3）按下机床操作面板上的机床锁住按键，按键指示灯亮，机床锁住运行有效。

4）按下机床操作面板上的循环起动按钮，机床处于锁住运行状态起动并运行加工程序。运行结束后，光标返回程序头。

（2）机床锁住运行应用技巧

1）机床锁住运行时，可按功能键PROG在程序与程序检查画面之间切换，如图 4-9 所示。前者主要显示程序执行的顺序，后者还显示坐标值和模态指令的变化等。



a)　　b)

图 4-9　程序与程序检查画面

a）程序画面　b）程序检查画面

2）锁住运行后，禁止直接空运行和自动执行数控程序，否则可能出现意外故障。锁住运行后，系统显示和计算的坐标位置与实际位置不相符，因此，锁住运行后必须执行一次返回坐标参考点操作，重新建立机床坐标系。

3）机床锁住运行是否锁住全部轴（有的机床仅锁住 Z 轴）与机床厂家的设计有关，具体以机床说明书为准。

4）机床锁住运行时，M、S 和 T 指令被执行，因此主轴一般是旋转的。

5）机床锁住运行是自动工作方式下的一种运行模式，故仍可执行机床自动运行时的相关操作，如常常切换至图形显示画面检查刀具轨迹。

2. 空运行

机床空运行与锁住运行相比增加了刀具移动轨迹验证功能。机床空运行时各坐标轴按程序控制的轨迹快速移动，其移动速度由参数设定，相当于 G00 的移动速度，不受程序中 F 指令的控制。空运行是数控程序锁住运行检查之后进一步的程序检查方法。

（1）机床空运行的操作步骤

1）在编辑方式下调出待运行的数控程序。

2）按下自动方式按键，按键指示灯点亮，自动方式有效。按功能键PROG切换至合适的程序显示画面。

3）按下机床操作面板上的机床空运行按键，按键指示灯点亮，空运行有效。

4）按下机床操作面板上的循环起动按钮启动加工程序，机床进入空运行状态。

注意：空运行与锁住运行操作差异主要在第3)步。

（2）机床空运行应用技巧与禁忌

1）机床空运行仍属于自动工作方式下的一种运行模式，故程序执行时各操作画面的切换与锁住运行相同，如常常切换至坐标显示画面观察坐标值的变化。

2）空运行的运动速度由参数No.1410设定，一般远大于切削进给速度。空运行速度仍可由进给速度倍率调节旋钮修调。因此，空运行检查程序运动轨迹的时间比实际切削时间短得多。

3）空运行模式禁止刀具与工件接触进行切削，因此，空运行时一般不安装工件，或将工件坐标系适当提高，避免刀具与工件接触。

4）空运行期间，进给倍率等调节仍然有效，因此，进给倍率在一定程度上可以控制程序执行的速度，便于观察。

5）机床可同时执行锁住运行与空运行。

3. 单段运行

单段运行是单程序段运行的简称，指每按下一次[循环起动]按钮，CNC系统只执行一个程序段，然后机床停止。必须再一次按下[循环起动]按钮，才能执行下一个程序段。单段运行时，刀具移动速度受程序中指定的F指令控制，因此可进行切削加工。通过单段运行程序，操作者可最大限度地掌控程序的自动执行过程，常用于程序的初次试切加工过程。

（1）机床单段运行的操作步骤

1）在编辑方式下调出待运行的程序。

2）按下[自动]方式按键，按键指示灯点亮，自动方式有效。

3）按下机床操作面板上的机床[单段]按键，按键指示灯点亮，单段方式有效。

4）按下机床操作面板上的[循环起动]按键，程序将单段执行，程序段执行完后机床会自动停止等待。

5）重复第4）步，继续单段执行程序。

（2）单段运行应用技巧与禁忌

1）单段运行程序时，移动速度受F指令控制，故可用于工件切削加工，主要用于首件试切检查程序。

2）单段运行的移动速度仍然受进给倍率调节开关控制，因此，配合进给倍率修调，可更好地控制程序执行时的运动速度。

3）单段运行期间，释放[单段]控制按键，可方便地转至自动运行模式，进入连续执行程序的加工状态。因此，即使是合格的程序运行时，也常在前面几段执行单段运行模式，确认工件坐标系等正确后再转入自动连续执行模式进行加工。

4）机床执行锁住运行与空运行时，亦可单段执行程序。

4. 自动运行

自动运行包含两个概念：首先，自动运行是数控机床工作方式之一，前述的锁住运行、空运行和单段运行均属于自动工作方式中的一种运行方式；其次，自动运行常指数控机床连续运行进行加工的运行模式，连续运行加工的模式包括存储器运行（执行数控系统内存中

的程序)、DNC 运行（执行系统外部存储介质上的程序，如存储卡或 PC 等)，甚至 MDI（MDI 全称为手动数据输入，笔者认为应该属于手动操作运行机床的一种方式）运行，但实际中常将存储器运行简称为自动运行。

以存储器运行为例，其可在自动工作方式下直接调用程序运行，也可在编辑方式下调出加工程序然后转为自动工作方式运行程序。

（1）自动工作方式下直接调用运行　操作步骤如下：

1）按下[自动]工作方式按键。

2）按下功能键[PROG]，进入程序画面，默认显示最近一次使用的程序。

3）在输入缓冲区键入程序名 O××××。

4）按下光标移动键[↓]或［O 检索］软键，即可调出待加工程序。

5）按机床操作面板上[循环起动]按键，按键指示灯点亮，自动运行启动，程序执行时光标不断滚动，显示正在执行的程序段。

6）程序自动运行结束后，光标返回程序头，[循环起动]按键指示灯熄灭。

应用技巧与禁忌：

1）执行第 2)步时，必须确保所调用的程序在数控系统中存在。

2）第 2)步进入的画面，可按功能键[PROG]在程序检查画面或程序画面之间进行切换。

3）第 3)步键入的程序名必须是“字母 O＋数字”模式，数字前零可省略。

4）程序自动运行期间，可对操作画面进行切换，包括坐标位置画面、图形显示画面和偏置/设定画面等。

5）自动运行期间，光标不断滚动，显示当前正在执行的程序段。

6）程序自动运行期间，禁止执行手动操作工作台的移动（包括手轮操作)。

7）自动运行期间，可进行主轴倍率和进给倍率调节。可随时按下[循环停止]键暂时停止程序运行，可随时按下[RESET]键或[急停]键终止程序执行。

8）自动运行期间，可进行其他程序的后台编辑。

（2）编辑方式调出程序后运行　自动方式下运行程序的前提是所运行的程序必须存在于数控系统的存储器中，若不确定，则必须在编辑方式下查找并调出程序，然后转入自动工作方式执行程序。实际中这种方式应用更加广泛。

编辑方式调出程序后运行　操作步骤如下所述：

1）按下[编辑]工作方式按键。

2）按下功能键[PROG]，进入程序画面。

3）按下［列表］软键，切换到程序目录画面，查阅并确定程序的存在与否。

4）在输入缓冲区键入程序名 O××××，下部软键会发生变化，出现［O 搜索］软键。

5）按下光标移动键[↓]或［O 检索］软键，调出待加工程序。

6）按下[自动]工作方式按键，进入自动工作方式。

7）按机床操作面板上 循环起动 按键，按键指示灯点亮，自动运行启动，后续效果同上。

应用技巧与禁忌：第6)步执行前，需保证光标处在程序头，否则，可按复位键 RESET 使光标返回程序头。

5. 自动运行调试程序的注意事项

自动运行调试程序是程序编制的最后环节。有资料介绍用代木、塑料和铝块等为材料试切加工，但笔者认为这个环节必须用与真实加工材料相同的材料试切，并且最好是在最终使用的机床环境中试切，这种试切检验程序才能算得上真正意义上的“首件试切”。

4.2.3　程序调试相关功能应用技巧

顺序执行以上四种运行模式，是机床上程序检查的基本步骤。程序检查与调试时，以下几项功能有助于程序检查与程序优化。

1. 刀具轨迹的图形显示

数控机床一般均提供图形仿真功能，帮助操作者图形化地分析程序运动轨迹。不同数控系统操作步骤略有差异，以下以前述的数控铣削与数控车削系统分别叙述。

（1）FANUC 0i MC 铣削系统图形仿真　操作步骤如下：

1）按下 编辑 方式键，按下功能键 PROG，调出待加工的数控程序。

2）按下 自动 方式键，按下 机床锁住 键，使机床处于锁住状态下运行程序。

3）按下功能键 CSTM/GR，进入图形参数显示画面。必要时可对绘图参数进行设置。

4）按下［图形］软键，显示绘图画面和绘图坐标系。

5）按下 循环起动 键，启动程序执行，并开始动态绘制刀具轨迹。图4-10为图3-106所示凸轮槽加工轨迹仿真画面。

6）图形仿真结束后，按下［（操作）］软键，下部软键变化，出现［擦除］软键。

7）按下［擦除］软键，可以看到所绘制的刀具轨迹消失，可重新图形仿真。

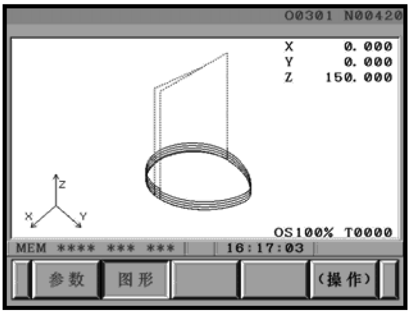


图4-10　FANUC 0i MC 铣削系统轨迹仿真画面

（2）**FANUC 0i MC 铣削系统图形仿真技巧与禁忌**

1）刀具轨迹的图形仿真在机床锁住运行、空运行、单段运行与自动运行方式下均有效，但一般在机床锁住方式下进行较为保险。

2）轨迹仿真中，图形仿真过程与程序执行过程是同步的，右上角的坐标值随着图形的绘制不断变化直至停止。

3）图4-10左下角所示坐标表示图形显示的观察角度，可根据需要在第3)步的显示画面中修改，如二维加工程序常选择 *XY* 平面坐标系。

4）仿真期间，可旋转进给倍率调节旋钮控制刀路轨迹的动态仿真进程速度。

（3）FANUC 0i Mate-TC 车削系统图形仿真　操作步骤如下：

1）按下 编辑 方式键，按下功能键 PROG ，调出待加工的数控程序。

2）按下 自动 方式键，按下 锁住 键，使机床处于锁住状态下运行程序。

3）按下功能键 CSTM/GR ，进入图形参数显示画面。必要时可对绘图参数进行设置。

4）按下［图形］软键，显示绘图画面和绘图坐标系。

5）按下［执行］软键，可以看到画面右下角出现了“画图”字样，并且画面上按加工轨迹逐渐绘制图形，右上角的坐标值随着图形的绘制不断变化。

6）图形绘制完成后“画图”字样消失，右上角的坐标值停止变化。图 4-11 所示为 FANUC 0i Mate-TC 车削系统图形仿真画面。

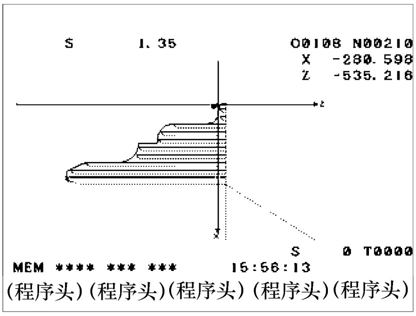


图 4-11　FANUC 0i Mate-TC 车削系统轨迹仿真画面

仿真画面下部几个软键的说明：

1）［执行］软键：按下后系统开始绘制刀具运动轨迹。

2）［停止］软键：可以使正在绘制的刀具运动轨迹暂时停止。

3）［继续］软键：使暂时停止绘制的刀具运动轨迹继续执行下去。

4）［程序头］软键：使暂时停止绘制的刀具运动轨迹从头开始绘制。

5）［擦除］软键：清除已绘制的刀具运动轨迹。

（4）**FANUC 0i Mate-TC 车削系统图形仿真技巧与禁忌**

1）刀具轨迹的图形仿真一般在机床锁住方式下进行。

2）轨迹仿真中，图形仿真过程与程序执行过程是同步的，右上角的坐标值随着图形的绘制不断变化直至停止。

3）图形显示区域可以用夹点的方式进行调整，注意这一点与 FANUC 0i MC 铣削系统不同。

4）刀路轨迹的绘制速度同样可用进给倍率调节旋钮进行调节。

5）由上面叙述可见，同样是 FANUC 0i 系统，车削与铣削系统的操作方式略有不同。因此，必须以所使用数控系统的操作说明书为准。

2. 主轴速度与进给速度的倍率修调

数控机床的主轴速度与进给速度可以方便地用机床操作面板上的速度倍率修调旋钮或按键在一定范围内进行调整。这部分控制操作方式是由机床厂家设计的，故不同的机床其修调方式与范围不同。以下分别以图 4-3 和图 4-4 所示的机床操作面板为例进行介绍。

（1）CKA6150 型数控车床的主轴与进给速度倍率修调　由图 4-2 所示的画面可见，该机床主轴速度、进给速度和快速运动速度倍率修调是分开设计的。进给速度倍率修调为旋钮式的，调节范围为 0% ~150%（对手动移动速度也有效）；快速运动速度倍率修调为按键式的，分四挡调节（图中 F0 、 25% 、 50% 和 100% 四个按键），100% 挡倍率速度等于 G00 的移动速度，由参数 No. 1420 设定，25% 和 50% 挡可对 100% 挡的速度倍率修调，F0 的速度为固定的，由参数 No. 1421 设定，一般远小于 G00 的速度；主轴速度倍率修调也为按键

式的（图中主轴减小、主轴100%和主轴增加三个按键），主轴100%按键对应程序中S指令指定的速度，每按一次主轴增加或主轴减小按键，主轴速度增加或减少10%，主轴速度倍率调节范围为50%～120%。

（2）XKA714型数控铣床的主轴与进给速度倍率修调　由图4-3所示的画面可见，该机床主轴速度、进给速度和快速运动速度倍率修调均为旋钮式，其中进给速度和快速移动速度倍率修调设计为同一旋钮操控。其主轴速度倍率修调范围为50%～120%，切削进给倍率修调范围为0%～120%（对手动进给移动速度也有效），快速进给修调倍率仍然为F0、25%、50%和100%四挡。

（3）**主轴速度与进给速度的倍率修调应用技巧与禁忌**

1）速度倍率修调为数控程序编制中相应指令值的选择提供了一个思考空间。

2）注意主轴速度修调倍率一般为50%～120%，向下修调范围略大，因此，编程时主轴速度可以取得略大。

3）进给速度修调倍率为0%～120%（XKA714）和0%～150%（CKA6150）连续可调，总体表现为向下调整范围很大，因此，编程时进给速度可以取得偏大一点。

4）第2)、3）点的调节范围变化规律为程序调试提供了一个较大的试切调整空间，特别是向下调整的范围大于向上调整的范围，使得其取值表现为偏大的特点，若向上调节范围大，则取值偏大的程度也可以高一点（如CKA6150数控车床）。正是这样一种变化规律，使得我们平时看到的数控程序，其主轴速度与进给速度值一般取得较大。

5）速度修调为程序的调试与加工过程中的修正提供了一个非常便捷的方法，操作数控机床时多注意研习一下其应用场合。如程序调试或运行的初期，常常用较低的进给速度切削；在连续切削时，依据加工情况，逐渐调大进给量并稳定加工，必要时可根据加工情况随时修调。

3. 程序暂停与选择性暂停

辅助指令中有两个指令可以控制程序运行过程中的暂停，即M00和M01。这两个指令涉及循环起动和选择停按键。这两个指令除用于程序编制外，程序调试时也是可以用到的，如希望程序运行至某处停下来（或有条件地停下来）可临时插入M00（或M01）；若希望再执行一次前述的程序段，不必全部运行完程序，仅需按下RESET键即可跳出程序运行状态。

4. 程序段跳过

程序段跳过符号“/”与跳选（或程序段跳跃、跳步等）按键合作，可实现某程序段的跳过功能。程序调试时，可用该功能将已编制验证合格的程序段临时跳过，待全部程序调试通过后，再将不需要的跳过符号“/”删除。

4.3　数控程序的编辑与应用

数控加工程序是数控加工的基础，基于数控系统内存储的程序进行加工是最基本的加工方法。将程序输入数控系统的方法有三种：

1）MDI 面板手工键入加工程序，其离不开显示画面的表现，这是最基本的输入方法。

2）CF 存储卡输入/输出。

3）RS232C 接口与 PC 通信传输。

本节主要基于 LCD/MDI 面板为主的第 1 种方法进行讨论。

4.3.1　程序的检索、建立与删除

1. 程序的检索

程序的检索主要用于从数控系统存储器众多的加工程序中快速找到所需的加工程序，或查询数控系统中有哪些加工程序等。这是程序调用前期可能要做的工作。

程序检索的方法与技巧　程序检索是在编辑工作方式下进行的，所用的程序画面如图 4-12 所示，检索方法如下所述：

1）直接检索所有的程序，操作图解如图 4-12 所示，操作步骤如下：

① 按下[编辑]方式按键，按键指示灯点亮，编辑工作方式有效。

② 按下功能键[PROG]进入程序画面。默认显示的是最近一次使用的程序。

③ 单击［列表］软键进入程序目录画面，显示存储器中的程序列表及注释项，同时［列表］软键变化为［列表⁺］。

④ 单击［列表⁺］软键可进一步显示程序的容量和更新时间等，多次单击该软键可在注释与容量和更新时间画面之间进行切换。

⑤ 按翻页键[PAGE↑]或[PAGE↓]可在多页程序目录画面中浏览。

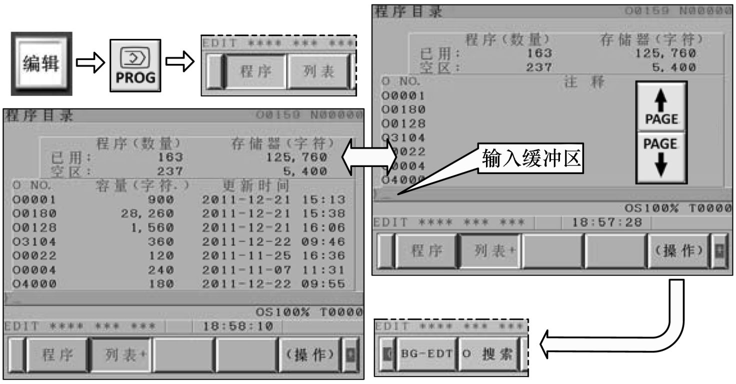


图 4-12　程序检索图解

2）直接检索某一程序，操作步骤如下：

① 按下[编辑]方式按键，按键指示灯点亮，编辑工作方式有效。

② 按下功能键[PROG]进入程序画面。默认显示的是最近一次使用的程序。

③ 在输入缓冲区键入待检索的程序名 O××××。必要时，按下［(操作)］软键，画面下部的操作软键发生变化，出现［O 搜索］软键，参见图 4-12。

④ 按下［O 搜索］软键（或按下光标移动键[↓]），切换至程序画面，并显示出检索的

程序。

3）按顺序检索所有程序，操作步骤如下：

① 按下编辑方式按键，按键指示灯点亮，编辑工作方式有效。

② 按下功能键PROG进入程序画面。

③ 按下［(操作)］软键，画面下部出现［O 搜索］软键。

④ 不断按下软键［O 搜索］即可依次显示所有程序。

4）**程序检索注意事项**，如下所述：

① 程序检索是基于程序名检索，程序内容必须在检索后进入程序画面查看。

② 在直接检索程序时，若检索的程序不存在，则出现。71 号报警（数据未找到）。

③ 程序画面中注释项手工输入繁琐，且占用存储空间，故大部分程序未输入这一项。

④ 程序检索与调用的区别。前者指在编辑方式下查阅程序，后者指在自动方式下直接调出程序。检索出的程序可进行编辑，也可以通过按下［自动］方式键进入自动方式运行程序。而自动方式调出的程序不能直接编辑，但可直接按下循环起动按键执行程序，当然，也可通过按下［编辑］方式键进入编辑方式修改程序。

2. 程序的创建

数控程序的创建指在数控系统的存储器中创建一个完整的加工程序。程序的创建可以通过 MDI 键盘手工输入，也可以从外部的存储介质（CF 卡或 PC）上传输获得，后者创建的程序包括完整的程序内容。以下仅介绍 MDI 键盘手工输入。

（1）数控程序的建立　操作图解如图 4-13 所示，操作步骤如下：

1）按下编辑方式按钮，按钮指示灯亮，编辑工作方式有效。

2）按下功能键PROG进入程序画面。

3）在输入缓冲区键入程序名 O××××。

4）按下INSERT键，键入的程序名显示在程序画面左上角，同时，程序注册成功。

5）注册程序后，即可利用 MDI 键盘上的地址和数字键等，配合EOB键和INSERT键等完成程序段的输入，如按EOB键和INSERT键换行进入程序输入状态。

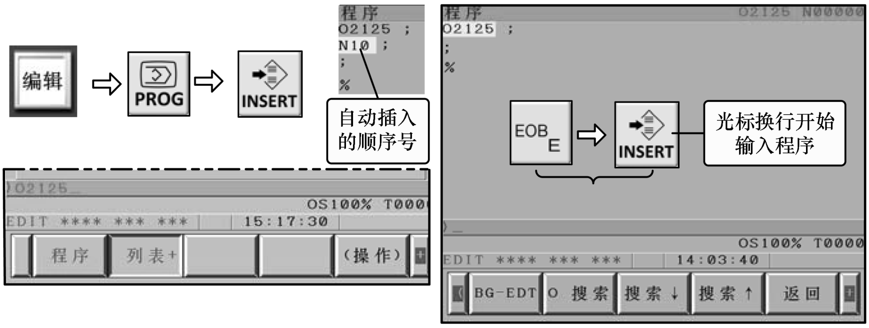


图 4-13 程序的创建（注册）

（2）**程序创建的技巧与禁忌**

1）以上第 3) 步操作也可在程序画面或程序列表画面中进行。

2）以上第 4) 步，仅仅是创建了一个空白的数控程序，如图 4-13 所示。

3）程序创建之前必须确保程序保护锁被打开。

4）程序创建时输入的程序名不得与数控系统中已存在的程序名重复，否则系统产生 73 号报警（程序号已存在）。必要时对系统的程序号进行检索。

5）MDI 键盘手工直接创建程序，程序头和尾可以不考虑程序开始与结束符“%”，且程序尾自然存在一个结束符“%”。

6）第 5) 步中程序输入过程中是否自动插入顺序号由参数 No. 0000#5（SEQ）设定（该参数也可在“设定”画面中设置），顺序号增量由参数 No. 3216 设定。

注意：第一个程序段的顺序号就是顺序号的起始值，操作者可以修改。

7）可以在程序中的符号“（”和“）”之间加上注释。如“M08（COOLLANT ON）”，输入的注释一同被保存。参数 No. 3204 第 0 位的 PAR 用于设置 MDI 面板上“［”和“］”键的输入形式。当 PAR = 0 时，作为方括号“［”和“］”使用；当 PAR = 1 时，则是作为圆括号“（”和“）”使用。

3. 程序的删除

会创建程序就必须会删除程序。删除程序的方法有三种。

（1）删除一个程序　操作步骤如下：

1）按下 编辑 方式按钮，按钮指示灯亮，编辑工作方式有效。

2）按下功能键 PROG 进入程序画面，查找待删除的程序是否存在。

3）在输入缓冲区键入待删除程序名。

4）按下 DELETE 键，完成一个程序的删除。

（2）删除指定范围的程序　操作步骤基本同上，仅第 3) 步不同，若键入 OXXXX、OYYYY，则删除的是起始号为 XXXX、结束号为 YYYY 范围内的程序。

（3）删除全部程序　操作步骤基本同上，仅第 3) 步不同，若键入 0 ~ 9999，则删除全部程序。

（4）**程序删除技巧与禁忌**

1）同创建程序一样，删除程序之前必须将程序保护锁打开。

2）删除程序要慎重，特别是删除全部程序操作。

4.3.2 程序的输入与编辑

1. 程序的输入

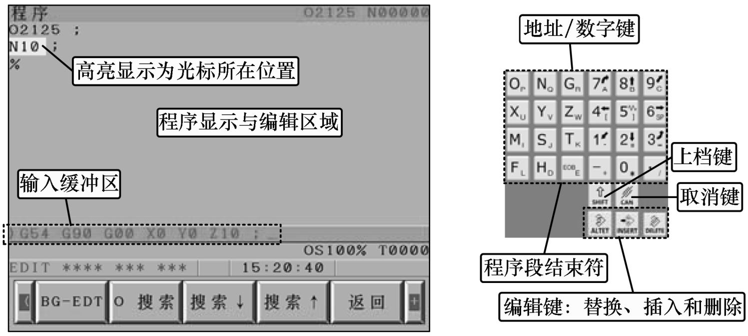
（1）程序的输入与编辑基础　创建程序的主要内容是程序的输入。程序编辑就是程序的修改，程序的输入与修改往往是穿插进行的。程序的输入与编辑主要是由 MDI 面板上的相应字母、数字和编辑键等配合 LCD 显示画面进行，所用到的按键及功能键如图 4-14 所示。

（2）**程序输入技巧与禁忌**

1）输入缓冲区键入的必须是一个字、多个字或一个程序段。

2）按插入键 INSERT，输入缓冲区中的内容输入在光标后面；按替换键 ALTER 输入缓

冲区的内容替换光标所在位置的内容；按删除键 DELETE 删除光标所在位置的内容。



a)　　　　b)

图 4-14　程序输入操作说明

a）程序显示与编辑画面　b）程序输入常用按键

3）按下上档键 SHIFT，则可输入地址/数字键右下角的字母或数字。

4）按取消键 CAN 可删除输入缓冲区中最后一个字母或符号。

5）EOB（END OF BLOCK 的缩写）是程序段结束符，按下 EOB 键，再按 INSERT 键，则相当于输入了一个程序段结束符“;”并换行。

2. 程序的编辑

程序的编辑指对程序的局部进行插入、修改（又称替代）和删除等。当然，编辑过程离不开检索待编辑的内容。程序的编辑与输入一样，以字为最小单位进行。

（1）字的检索　有三种方法：移动光标检索（又称扫描检索）、字检索和地址检索。

移动光标检索主要由光标移动键实现，也可用翻页键快速移动，操作步骤如下：

① 按下光标移动键 → / ← 一次，光标在屏幕上向前/向后逐字移动，光标在被选择字处高亮显示；持续按住光标键 → / ←，则连续扫描字。

② 按下光标移动键 ↑ / ↓ 一次，光标移动至上/下一个程序段的第一个字；持续按住光标键 ↑ / ↓，则光标连续移动到下/上一个程序段开头。

③ 按上/下翻页键 PAGE↑ / PAGE↓ 一次，显示上/下一页并检索到该页的第一个字；持续按住翻页键 PAGE↑ / PAGE↓，则向上/下一页接一页地持续显示。

（2）搜索字检索　操作步骤如下：

1）按 编辑 键，PROG 键和［（操作）］软键，进入程序操作画面。

2）在输入缓冲区键入待检索的字，如 S300。

3）按下［搜索↓］/［搜索↑］软键（见图 4-14），光标迅速移到检索的字处。

字检索技巧如下：

1）字的检索是以完整字进行，否则检索不到。例如，要检索 S1500、M03、X150. 时仅键入 S15、M3、X150 时均检索不到。

2）软键［搜索↓］和［搜索↑］分别是从光标当前位置向下和向上检索。因此，一般

先按复位键将光标移至程序头，然后只需按［搜索↓］软键即可。

3）检索时，可按光标移动键↑和↓代替软键［搜索↓］和［搜索↑］。

（3）字地址检索　假设用字地址 M 检索，操作步骤如下：

1）按编辑键、按PROG键，进入程序画面。

2）按下［(操作)］软键，进入程序编辑操作画面（图 4-14a）。

3）在输入缓冲区键入待检索的字地址，如 M。

4）按下［搜索↓］/［搜索↑］软键，光标向下/向上搜索并停留在第一个检索到的含地址 M 的字上。

（4）字检索无结果　若字地址检索无结果，则产生 071 号报警（数据未找到）。按复位键RESET消除报警。

3. 光标移向程序头

光标移向程序头就是将光标移到程序的起始位置。在程序编辑以及程序自动运行时常常用到这个功能。光标移向程序头的方法有三种。

（1）程序复位法　在编辑方式下的程序画面中，按下RESET键，光标立即返回程序头。

（2）［返回］软键操作法　在图 4-14 所示的程序操作画面中，按下［返回］软键，光标快速移到程序头。

（3）程序号检索法　在图 4-14 所示的程序操作画面中，在输入缓冲区键入程序号（如图中的 O2125），按下［O 搜索］软键，光标快速移到程序头。

应用技巧：以上操作，在自动工作方式下也有效。

4. 字的插入、替换与删除

在 MDI 面板上，有三个编辑键（图 4-14）——插入键INSERT、替换键ALTER和删除键DELETE，分别用于字的插入、替换与删除编辑。三个键的操作方法基本相同，具体为：

1）按编辑和PROG键，进入程序画面。

2）按前述的字检索方法，将光标定位至待编辑字处。

3）在输入缓冲区键入待插入或替换的字（字的删除不需要这一步）。

4）按下插入键INSERT，输入缓冲区中的内容插入在光标后面；按替换键ALTER输入缓冲区的内容替换光标所在位置的内容；按删除键DELETE，光标所在位置的字被删除。

5. 删除程序段

应用上述字的删除方法删除一个或多个程序段显然不便，为此，系统提供了删除程序段功能，具体方法如下：

（1）顺序号检索　要删除程序段，首先必须找到程序段，这称为检索，程序段一般按顺序号检索。操作方法如下：

1）按编辑和PROG键，进入程序画面。

2）按下［(操作)］软键，进入程序编辑操作画面，可看到下部软键发生变化（图 4-14a）。

3）在输入缓冲区输入待检索的程序段序号 N×××。

4）按下［搜索↓］软键，可看到光标快速移动至检索的程序段 N×××处。若检索无结果，则会产生 71 号报警（数据未找到）。

注意：在自动方式下，也有顺序号检索功能，但其目的不是用于程序编辑。此处介绍是为了与编辑方式下顺序号检索方法进行比较。操作步骤如下：

1）按编辑和PROG键，调出程序 O××××。

2）按自动键进入自动方式程序画面。

3）按下［(操作)］软键，进入操作画面，可以看到其中有一个［N 搜索］软键，它用于顺序号搜索。

4）在输入缓冲区键入待检索的顺序号，如 N×××，然后按下［N 搜索］软键，CNC 系统逐行快速搜索，并停留在搜索到的程序段 N×××上。若检索无结果，则产生 071 号报警（找不到顺序号）。

（2）删除一个程序段　指从当前的程序段顺序号字位置到下一个 EOB 之间的内容被删除。操作步骤如下：

1）按编辑和PROG键，进入程序画面。

2）按顺序号检索到待删除程序段序号，如 N××。

3）在输入缓冲区键入待删除的程序段序号 N××并按下EOB键。

4）按下删除键DELETE，则程序段 N××被删除，光标移动到下一个程序段的顺序号上。

（3）删除多个程序段　是指从当前显示的程序段 NXXXX 到指定顺序号 NYYYY 之间的程序段全部删除，操作步骤如下：

1）按编辑和PROG键，进入程序画面。

2）按顺序号检索到待删除起始程序段序号 NXXXX 处。

3）在输入缓冲区输入待删除多个程序段最后一个程序段序号 NYYYY 并按下EOB键。

4）按下DELETE键，则程序段 NXXXX～NYYYY 的内容被删除。光标移动到 NYYYY 程序段下一个程序段的顺序号上。

若删除的程序段太多时，会产生 070 号报警（存储器容量不足），此时，可减少一些要删除的程序段数。

4.3.3　其他程序编辑功能

1. 后台编辑功能

所谓后台编辑，是指在一个程序编辑或执行期间可以对另一个程序进行普通的编辑。后台的编辑会保存在前台编辑的存储器中，在退出后台编辑后依然存在。后台编辑进入的方法如下：

（1）后台编辑的进入与退出　如图 4-15 所示，操作方法如下：

1）假设当前正在执行某一程序，如图 4-15 中左侧画面。

2）按下［(操作)］软键，进入程序操作画面，可看到下部操作软件发生变化，出现了

一个［BG-EDT］软键。

3）按下［BG-EDT］软键，进入后台编辑程序画面，如图 4-15 中右侧画面。可像普通编辑方式的程序创建、输入、调用与编辑一样工作。

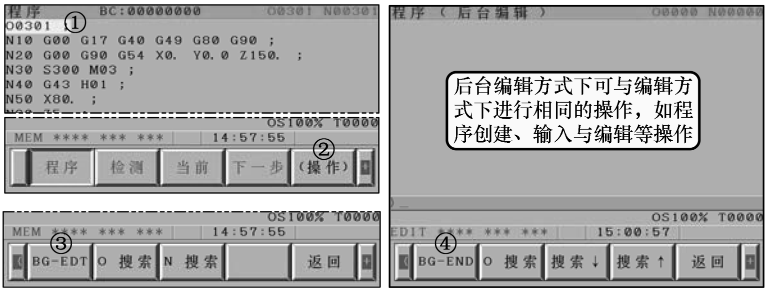


图 4-15　后台编辑的进入与退出

4）在后台编辑画面中，按下［BG-END］软键，可退出后台编辑状态。

（2）**后台编辑应用技巧与禁忌**

1）后台编辑功能可在自动或编辑工作方式中执行，其操作方法与前台相同，所做的操作在退出后台编辑后依然存在。

2）后台编辑期间发生的报警不会影响前台操作。同样，前台执行期间发生的报警也不会影响后台编辑。

3）后台编辑期间，若企图编辑前台操作或执行的程序，则会发生 140 号报警（BP/S 报警）。相反，前台操作期间企图选择一个后台编辑状态下的程序（通过子程序调用或用外部信号对程序号检索操作），在前台操作中也会发生 P/S 报警（报警号 No. 059，078）。

4）后台编辑的报警与前台完全相同，但后台编辑的报警显示在后台编辑画面的数据输入行。

2. 程序的复制、移动、合并及替换功能

FANUC 0i 系统允许用户在数控系统中进行现有程序的复制（包括全部复制或部分复制）、移动（将程序的一部分移出成为一个程序）、合并（将两个程序合并为一个程序）以及程序中某一字的自动搜索与替换操作。这部分内容属数控程序编辑的扩展操作，内容较多，参考文献［10］和［12］有较详细的介绍，这里抛砖引玉地介绍一下程序的全部复制功能。

（1）程序的全部复制　操作过程如下：

1）按 编辑 和 PROG 键，进入程序画面，检索出某加工程序 OXXXX。

2）按下［（操作）］软键，进入程序操作画面。

3）按继续菜单键▶，程序操作画面翻页，找到具有［EX-EDT］软键的画面。

4）按下［EX-EDT］软键，进入程序编辑功能扩展画面。

在程序编辑功能扩展画面中可以看到下部的软键包括［复制］、［移动］、［合并］和［替换］四个软键，这正是程序扩展操作的四个功能，此处仅介绍［复制］软键的功能。

5）按下［复制］软键，进入程序复制画面。

6）按下［全部］软键，选择复制整个程序。

7）在输入缓冲区键入新程序名 YYYY（注意，这里输入的新文件名不包括大写字母O）。

8）在 MDI 面板上按下 INPUT 键，将缓冲区的新文件名输入完成。

9）按下［执行］软键，完成整个程序的复制。程序复制期间，画面右下角会出现闪烁的“编辑”字样。

（2）应用技巧与禁忌

1）第 4)步进入的程序编辑功能扩展画面下部的四个软键——［复制］、［移动］、［合并］和［替换］可进行程序的复制、移动、合并与替换操作，前 4 步相同，后续操作按提示即可完成。

2）第 7)步输入的新程序名不得含有字母 O，且数字不得与系统内存在的程序名重复。

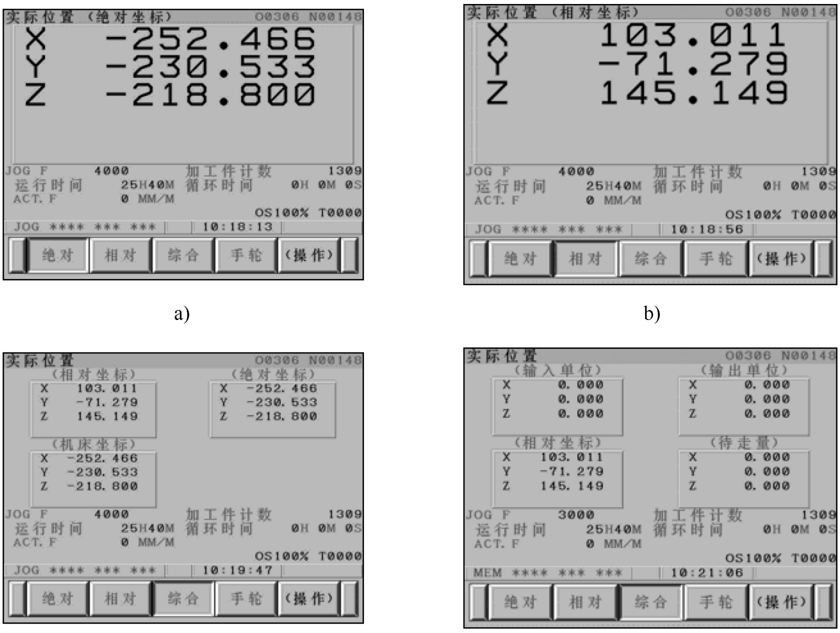
3）应用程序全部复制功能，可在某程序修改前进行备份。

4.4　坐标位置显示画面与应用

4.4.1　坐标位置显示画面的操作

1. 坐标位置显示画面的操作

（1）数控铣床的位置显示画面　图 4-16 所示为 FANUC 0i MC 铣削系统坐标位置显示画面。

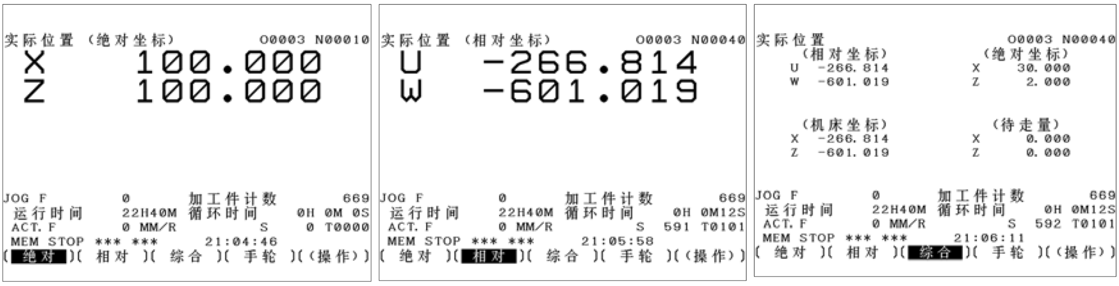


a)　b)　c)　d)

图 4-16　FANUC 0i MC 铣削系统位置坐标显示画面

a）绝对坐标显示　b）相对坐标显示　c）综合坐标显示　d）自动方式下综合坐标显示

（2）数控车床的位置显示画面　图 4-17 所示为 FANUC 0i TC 车削系统坐标自动工作方式下的位置显示画面，若在手动工作方式下，图 c 画面中没有“待走量”一项。



a)　　b)　　c)

图 4-17　FANUC 0i TC 车削系统位置显示画面

a）绝对坐标显示　b）相对坐标显示　c）自动方式下的综合坐标显示

（3）**坐标位置画面的进入与操作技巧**

1）绝对坐标位置显示画面是数控机床开机默认的显示画面。

2）按下 MDI 面板上的功能键 POS 可进入坐标位置显示画面。

3）按下部相应的软键［绝对］、［相对］和［综合］可进入相应的坐标位置显示画面。

4）连续按功能键 POS 可在绝对、相对和综合坐标位置画面之间进行切换。

5）自动方式下的综合坐标画面多一项“待走量”，且程序执行时所有坐标显示值是不断变化的。

2. 各坐标位置的含义

（1）各坐标位置的含义

绝对坐标：刀位点当前位置相对于工件坐标系的坐标值。

相对坐标：刀位点当前位置相对于某预置的相对坐标原点的坐标值。

机床坐标：刀位点当前位置相对于机床参考点的坐标值。

（2）**坐标位置显示画面的应用技巧与禁忌**

1）坐标位置显示画面下部，还显示有实际进给速度（ACT. F）和主轴转速（S）等信息。

2）绝对坐标值随工件坐标系的设置而变化。未建立工件坐标系前显示的是机床坐标值。

3）相对坐标不等于增量坐标。相对坐标原点可由操作者任意指定，可用于设定工件坐标系指令（G50 或 G92）的对刀操作，以及多刀加工非标准刀与标准刀相对偏置的测量与输入。

4）机床坐标系一般情况下均为负值。其坐标值与工件坐标系的设置无关。

5）执行返回机床参考点操作之前，无法建立机床坐标系，因此坐标显示不确定。

4.4.2　相对坐标位置显示与对刀的关系

相对坐标主要用于数控机床坐标系设定指令 G50/G92 对刀操作。

1. 数控车床 G50 指令对刀操作技巧分析

（1）**相对坐标原点指定技巧** 相对坐标原点的指定是相对坐标应用的基础，在图 4-17b 所示的相对坐标显示画面中，按下［(操作)］软键，可进入相对坐标操作画面，如图 4-18 所示，下部的［预置］和［归零］软键分别用于刀具当前位置相对坐标的预置和置零，若直接按［归零］软键，下部出现［所有轴］软键，可快速一次性将 X 轴和 Y 轴同时置零。相对坐标操作方法如下所述：

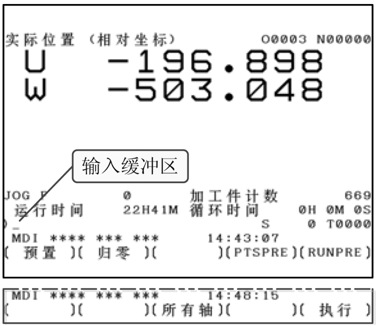


图 4-18 数控车相对坐标操作画面

1）各坐标轴单独预置与归零。操作步骤如下：

① 按功能键 POS ，进入坐标位置显示画面。

② 按下［相对］软键，进入相对坐标显示画面，参见图 4-17b。

③ 在输入缓冲区键入轴地址（U 或 W），选择操作轴。指定的轴地址（U 或 W）闪烁，同时画面切换到坐标值预置操作画面。

a）预置坐标操作。接轴地址后输入预置坐标值，按下［预置］软键，相对坐标变为预置值，同时轴地址闪烁消失。

b）坐标值置零操作。若在轴地址选择状态下直接按［归零］软键，则所选轴相对坐标置零，同时轴地址闪烁消失。

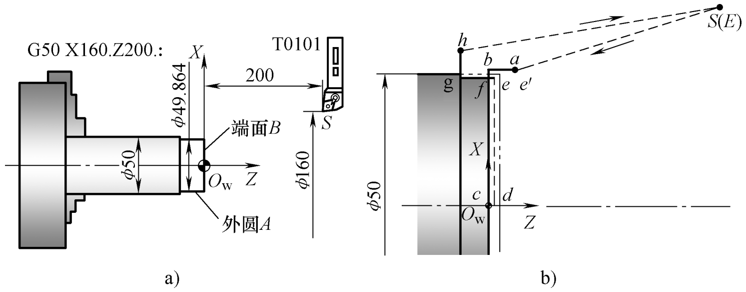
2）所有坐标轴一次归零。操作步骤如下：

①②操作同上。

③ 按下［归零］软键，进入所有轴复位画面，可以看到有一个［所有轴］软键。

④ 按下［所有轴］软键，则可一次性地将 X 轴和 Z 轴同时置零。

（2）数控车床 G50 指令设置工件坐标系原理分析 G50 指令设定工件坐标系必须用到相对坐标的概念与设置。图 4-19a 所示为 G50 指令设置工件坐标系原理示意图。图中，假设设置工件坐标系指令为 G50 X160. Z200.，则执行程序前刀具必须移至图示工件坐标系中起刀点 S 处，由于工件安装位置的不确定性，原点 O_w 的位置不确定，因此必须对刀操作设置 O_w 点为相对坐标原点，然后手动操作将刀具移至图示 S 点位置。



a) b)

图 4-19 G50 指令设置工件坐标系

a）设定原理 b）验证程序刀具轨迹

操作技巧：首先，起动主轴旋转试切外圆 *A*，然后 *Z* 轴退刀，停止主轴，测量外圆直径（假设为 ϕ49. 864），则在 *X* 轴不动的情况下预置其相对坐标为 U49. 864；接着起动主轴旋转试切端面，*X* 轴退刀，将 *Z* 轴坐标归零至 X0. 000；然后手动操作配合相对坐标显示移动刀具至 *S* 点（X160，Z200）处，完成 G50 指令对刀操作过程。

图中假设工件坐标系设定在工件端面轴心处，若欲将工件坐标系设置在端面内 1mm 位置处（即端面留加工余量 1mm），则上述操作的 *Z* 轴相对坐标不是归零，而是预置为 1mm。

操作禁忌：

① 试切对刀严禁在主轴静止状态下进行。

② 外圆试切对刀时，只能沿 *Z* 轴退刀，严禁有 *X* 轴移动；同理，试切端面时，只能沿 *X* 轴退刀，严禁 *Z* 轴移动。

③ 试切对刀时尽量不要在刀具切削状态下设置坐标操作，最好移出切削区，否则，刀具磨损严重。

④ 对刀前，必须清空刀具偏置与工件坐标系存储器的偏置值。

学习提示与思考：通过对刀操作，理解外圆车刀位点与刀尖位置的区别，以及为什么要引入刀位点的概念。

操作验证与学习技巧：读者可任找一个 G50 指令对刀的程序练习，或用以下验证程序检测自己的操作是否正确，并理解 G50 指令的操作与工作过程。图 4-19b 所示为其刀具轨迹。

O4190；	程序名（G50 验证学习程序）
N10 G50 X100. Z160. ；	G50 指令建立工件坐标系，刀具当前位置为起刀点 *S*
N20 S300 M03 T0101；	主轴正转，转速为 300r/min，调用 1 号刀及 1 号刀具补偿
N30 G00 X52. Z5. ；	快速定位至 *a* 点
/N40 G01 Z0 F0. 2；	进给移动至 *b* 点
/N50 X0；	车端面至 *c* 点
/N60 Z1. ；	*Z* 轴退刀至 *d* 点（退刀 1mm）
N70 G00 X49. ；	快速移动至 *e* 点
N80 G01 Z0；	进给切削至端面 *f* 点
/N90 Z-5. ；	切削外圆至 *g* 点
N100 U10. ；	*X* 轴退刀至 *h* 点
N110 G00 X100. Z160. T0100；	快速退刀至结束点 *E*
N120 M30；	程序结束，返回程序头

程序应用技巧分析：

1）程序执行前的工作：

① 输入程序，完成 G50 对刀。

② 确保机床操作面板上的程序段[跳选]按键被释放（按键指示灯熄灭）。

③ 清空 01 号刀具偏置存储器的偏置值。

2）按下[单段]按键，单段执行程序。注意以下事项：

① 执行至 N10 段时注意绝对坐标与相对坐标的变化情况以及刀具是否移动，请读者思考原因。

② 初步观察刀具运行至各点的坐标位置是否基本正确（刀具轨迹为 $S \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow E$）。

3）按下程序段跳选按键，按键指示灯点亮，跳选功能有效，再次单段执行程序，此时，刀具轨迹为 $S \rightarrow a \rightarrow e' \rightarrow f \rightarrow b \rightarrow E$（图中未示出），重点观察刀具移动至 f 点时刀尖与工件之间的关系。

4）此程序结束点 E 与起始点 S 重合，因此，程序可以重复执行。

5）本程序按工件直径为 50mm 编写。读者可根据实际情况修改 N30 和 N70。同时，N70 背吃刀量也可修改。

2. 数控铣床 G92 指令对刀操作技巧分析

（1）相对坐标原点指定说明　数控铣削系统相对坐标操作画面如图 4-20 所示，它与数控车削系统轴的相对坐标与绝对坐标地址相同，仅能从画面上部的文字标题识别。其操作方法与数控车床基本相同，仅输入的轴地址不同。操作方法略。

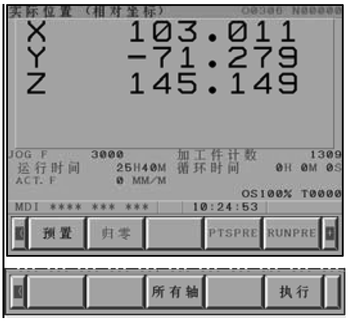


图 4-20　数控铣削系统相对坐标操作画面

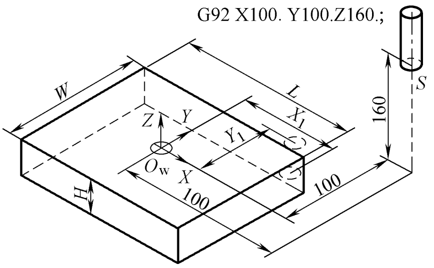


图 4-21　G92 指令设置工件坐标系原理

（2）数控铣床 G92 指令设置工件坐标系原理分析　G92 指令设置工件坐标系原理与前述的 G50 指令类似。以图 4-21 为例，假设工件坐标系设置在工件上表面几何分中位置，刀具直径为 d，工件坐标系设定指令为 G92 X100. Y100. Z160.，则程序执行前，刀具必须移至图示位置工件坐标系中的起刀点 S 处。这些工作必须通过对刀操作实现，其中要用到相对坐标的概念。

操作过程简述：首先，起动主轴旋转试切工件右侧面，将 X 轴相对坐标预置为 $X_1 = L/2 + d/2$；同理，试切后侧面，将 Y 轴相对坐标预置为 $Y_1 = W/2 + d/2$；再试切工件上表面，将 Z 轴相对坐标归零；然后手动操作配合相对坐标显示移动刀具至 S 点（X100，Y00，Z160）处，完成 G92 指令对刀操作过程。

注意思考以下问题：

1）若工件上表面欲预留加工余量 1mm，应该如何操作呢？

2）若试切的两侧面为左侧面和前侧面，则 X 轴相对坐标预置为 $X_1 = -(L/2 + d/2)$，Y 轴相对坐标预置为 $Y_1 = -(W/2 + d/2)$，为什么？

3）若工件坐标系设置在工件右上角，那上述操作过程简述中的相对坐标设置分别为

$X_1 = d/2$ 和 $Y_1 = d/2$，对吗？

（3）**操作技巧与禁忌**

1）试切对刀严禁不起动主轴试切。设置相对坐标操作时最好将刀具移出工件，避免刀具磨损，移动时注意待预设值的轴不得移动。

2）预置的坐标值实际上是刀位点相对于工件坐标系的坐标值（包含正、负号），故相对坐标值要加上刀具半径。

3）实际中，工件坐标系还有取在四个角点位置处，这时，相对坐标值可能仅仅是刀具半径，但坐标值的正、负号不同，读者必须熟练掌握。

4）上表面若想要预留加工余量，则 Z 轴相对坐标必须预置值。

5）数控铣床对刀操作，常借助于各种寻边器与高度对刀器等（见图 3-5 和图 3-6）操作。

提示：以上按刀位点选定在刀具端面几何中心位置讲解。

操作验证与学习技巧：这里也提供一个程序供参考，该程序将工件坐标系选在工件上表面四个顶点观察圆轨迹的位置更合适。程序分析略。

O4210；	程序名（G92 验证学习程序）
N10 G92 X0 Y0 Z120.；	G92 指令建立工件坐标系，刀具当前位置为起刀点 S
N20 S300 M03；	主轴正转，转速为 300r/min
N30 G90 G00 Z10.；	快速下刀至工件上表面 10mm 处
N40 G01 Z1. F50；	进给下刀至工件上表面 1mm 处
N50 M01；	选择停
/N60 Z-0.5；	进给下刀至材料内部 0.5mm 处
N70 G01 X30.；	横向移刀 30mm
N80 G03 I-30.；	逆时针加工整圆
N90 G01 X0；	返回圆心处工件上表面 10mm 处
/N100 Z0；	快速提刀至工件表面
N110 G00 X0 Y0 Z120.；	快速返会程序结束点 E
N120 M30；	程序结束，返回程序头

程序应用技巧分析：

1）程序执行前的工作：

① 输入程序，完成 G92 对刀。

② 确保机床操作面板上的程序段[跳选]按键被释放（按键指示灯熄灭）。

2）按下[单段]按键，单段执行程序。注意以下事项：

① 执行至 N10 段时注意绝对坐标与相对坐标的变化情况以及刀具是否移动。

② 初步观察刀具运行至各点的坐标位置是否基本正确。

③ 注意执行至程序段 N40 时刀具与工件的相对位置是否正确。

3）自动执行程序。再次按下[单段]按键释放单段方式（按键指示灯熄灭），按下[跳选]按键程序段跳过功能有效，按下[选择停]按键（按键指示灯点亮），M01 指令暂停有效，按

下 循环起动 按钮，自动执行程序。注意：

① 程序执行至 N50 段，会暂停执行程序，可观察刀具与工件之间的位置，确定对刀位置是否准确，再次按下 循环起动 按钮可继续执行。

② 释放 跳选 按键，执行程序，可在工件上加工出深度为 0.5mm 的整圆。

③ 释放 选择停 按键，执行程序，注意程序执行变化，体会 M01 指令的作用。

4）再次按下 选择停 按键，执行程序，程序执行至 N50 段会暂停，可重复观察刀具与工件之间位置关系。

5）此程序结束点 E 与起始点 S 重合，因此，程序可以重复执行。

6）本程序未给出毛坯尺寸，读者可自行设定。可分别以上表面四个角点和几何分中点为工件坐标系原点，练习对刀操作。

4.5　偏置显示画面与应用技巧

偏置是数控加工重要的概念之一，编程与操作过程中均用到，编程人员可通过操作深刻理解，而操作者必须理解程序中编程者的思想，并在加工过程中予以实现。数控车削系统与数控铣削系统关于偏置的表现与表达略有差异。

4.5.1　数控车床的偏置显示画面与应用技巧

1. 数控车削系统偏置画面的进入与操作

（1）偏置画面的进入　图 4-22 所示为数控车削系统偏置画面，操作过程如下：

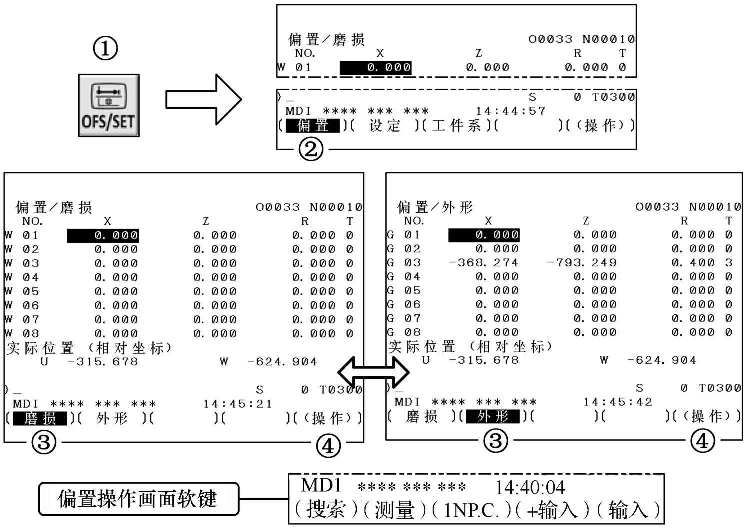


图 4-22　数控车削系统偏置画面

1）按下功能键 OFS/ SET 。

2）按下［偏置］软键，进入刀具偏置显示画面［若第 1）步已进入偏置画面，这一步可以省略］。

3）按下［外形］或［磨损］软键可在外形和磨损偏置画面之间进行切换。

4）按下［（操作）］软键可进入偏置操作画面，其底部的软键发生了变化。

（2）偏置画面的操作技巧与禁忌

1）画面顶部标题栏提示进入的是外形还是磨损画面。

2）系统将偏置分为两部分管理，前者可看成是基本值，后者可认为是微量调整值，刀具的实际偏置值是这两部分的代数和。

3）每个刀具偏置存储器包括四部分参数：几何偏置 X 和 Y 以及刀尖圆弧半径 R 和理论刀尖方向号 T。前者用于刀位点位置的偏移控制，后者用于刀尖圆弧的半径补偿。

4）刀具外形与磨损偏置存储器分别用偏置号 G××和 W××表示，FANUC 0i Mate-TC 数控系统提供了 64 个存储器，即可以使用 64 个刀具偏置号。按上/下翻页键 ↑PAGE / PAGE↓ 可逐页浏览。

5）按光标移动键（→/←和↑/↓）可移动光标并选择待操作的偏置值。各操作软键的作用如下：

①［搜索］软键：在输入缓冲区键入偏置号，按下［搜索］软键，可按偏置号快速检索。

②［测量］软键：将刀具当前位置相对于工件坐标系原点的偏置值与输入缓冲区键入的值相减直接存入当前刀具偏置存储器中（光标所在位置）。该软键常用于 T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系。输入缓冲区键入值的格式为：X×××或 Z×××。若输入的是 X0 或 Z0，则是将刀具当前位置的偏置值直接存入光标所在位置。

③［INP. C.］软键：将刀具当前位置的相对坐标值输入到偏置存储器中。该软键主要用于非基准刀对基准刀相对偏置矢量的输入。

④［+输入］软键：将输入缓冲区键入的值与光标所在位置的值相加（代数和），并存入光标所在位置。

⑤［输入］软键：将输入缓冲区键入的值直接替换光标所在位置的值，即键入值的直接输入。

6）尽可能利用外形与磨损两部分存储的特点管理偏置值，而不要直接在外形存储器中微调偏置值。

2. 数控车削系统偏置的应用技巧与禁忌

（1）T 指令刀具几何偏置的应用　T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系在数控车床上应用广泛。

1）几何偏置建立工件坐标系原理分析。以图 4-23 为例，假设图示 T0101 号刀具位置为机床参考点位置，工件坐标系原点 O_w 相对于机床参考点 O_m 的偏置矢量分别为 $-\alpha$ 和 $-\gamma$。刀具偏置的原理是刀具移动时相对于机床参考点的实际坐标值等于指令指定位置坐标与偏置值的代数和。假设先执行了指令 T0101，然后执行程序段 G00 X0 Z2.

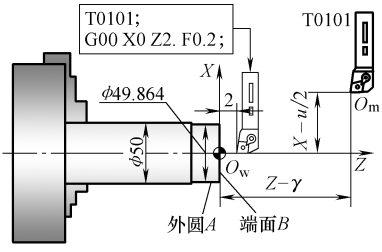


图 4-23　刀具几何偏置建立工件坐标系原理

时，刀具到达的位置是距工件端面中心 2mm 位置处。刀具相对于机床参考点的实际坐标为 $X=0+(-\alpha)=-\alpha$，$Z=2+(-\gamma)=-(\gamma-2)$。注意，这时绝对坐标显示是 X0.000 和 Z2.000，相当于将机床坐标系移至 O_w 位置处，建立起了工件坐标系。

2）T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系操作方法。以图 4-23 示意图为例，如下所述：

① 按下 MDI 方式键，将 T0101 号刀换至工作位置，并起动主轴旋转。

② 手动操作，试切外圆面 A，保持 X 轴不动，Z 轴退刀并停转主轴，测量试切外圆的直径，假设为 ϕ49.864。

③ 按下功能键 OFS/SET，依次按下［偏置］→［外形］→［(操作)］软键，进入外形偏置操作画面。

④ 光标定位至外形偏置存储器 G01 号 X 偏置处，在输入缓冲区键入轴地址 X 及试切外圆测量值（如前述的假设 X49.864），按下［测量］软键，完成 X 轴偏置设置。

⑤ 重新起动主轴，手动操作试切端面，保持 Z 轴不动，X 轴退刀。

⑥ 在外形偏置操作画面中，光标定位至 G01 号 Z 偏置处，键入 Z0 并按下［测量］软键，完成 Z 轴偏置设置。

至此完成了 T0101 号刀具建立工件坐标系的设置，若程序中执行了 T0101 指令，则可认为是建立起了工件坐标系。

3）**设置技巧与禁忌**

① T 指令刀具几何偏置建立工件坐标系应尽可能将 G54 工件坐标系存储器设置为全零状态，因为 G54 坐标系偏置的变化会影响到刀具几何偏置建立的工件坐标系，而 G54 工件坐标系的设置在返回参考点后立即生效。

② 严禁在主轴不转的状态下试切对刀。

③ 尽可能避免刀具切削的状态下停止刀具移动设置偏置值，同时避免刀具接触工件的状态下停止主轴。

④ 第②步的保持 X 轴不动和第⑤步的保持 Z 轴不动必须严格遵循。

4）操作验证程序。本程序在前述 G50 指令建立工件坐标系程序 O4190 的基础上修改而来，修改部分增加了下画线，程序刀具轨迹参见图 4-19b。

O4230;	程序名(T 指令建立工件坐标系验证学习程序)
<u>N10 S300 M03 T0101;</u>	主轴正转,调用 1 号刀及 1 号刀具补偿,建立工件坐标系
<u>N20 G00 X100. Z160.;</u>	快速定位至起刀点 S
N30 G90 G00 X52. Z5.;	快速定位至 a 点
/N40 G01 Z0 F0.2;	进给移动至 b 点
/N50 X0;	车端面至 c 点
/N60 Z1.	Z 轴退刀 d 点(退刀 1mm)
N70 G00 X49.;	快速移动至 e 点
N80 G01 Z0	进给移动至端面点 f
/N90 Z-5.	切削外圆至 g 点

N100 U10.；	X 轴退刀至 h 点
N110 G90 G00　X100.　Z160.；	快速退刀至结束点 E
N120 T0100；	取消 1 号刀具补偿
N130 M30；	程序结束,返回程序头

（2）数控车削系统刀尖圆弧半径补偿的应用技巧

1）刀尖圆弧半径补偿的应用技巧，如下所述：

① 刀具圆弧半径补偿主要用于工件轮廓存在圆弧面与锥面且尺寸精度有要求的场合。

② 刀尖理论方向号设置在外形补偿存储器中。

③ 刀尖圆弧半径补偿由刀具指令 T××□□调用，由指令 G41/G42 启动。

2）刀尖圆弧半径补偿验证示例。以图 2-98 的加工程序 O0245 为例，假设刀尖圆角半径为 0.8mm。

练习步骤：

① 准备一把刀尖圆弧半径为 0.8mm 的精车外圆车刀，并安装在 1 号刀位上。若条件允许，用线切割机床切割一块工件轮廓样板。另外，准备 ϕ50mm 尼龙棒一段，装夹在自定心卡盘上。

② 将程序 O2114 输入数控系统存储器中，基于 G54 指令对刀，完成对刀操作，建立工件坐标系。

③ 在刀具外形偏置补偿存储器中，将 1 号偏置存储器的 X 轴、Z 轴偏置值清零，并先将刀尖圆弧半径值 R 设置为 0，理论刀尖方向号 T 设置为 3。运行程序加工。若有样板，则用其检测工件外轮廓与样板的吻合程度。

④ 将刀尖圆弧半径值 R 修改为 0.8mm，改用 单段 方式，逐段加工外形轮廓，观察各段切削厚度的变化情况，特别关注圆弧和锥面段与圆柱和端面段加工时切削厚度的变化情况。加工完成后，再次用外廓样板检测其与工件的吻合程度。

⑤ 加工完成后，自行总结第④步刀尖圆弧半径 R 设置为 0.8mm 后各处切削厚度的变化情况，对照 2.9.1 节中关于刀尖圆弧半径补偿原理分析与理解刀尖圆弧半径补偿的情况。

另外，还可以将图 4-19b 所示的对刀验证程序 O4190 加入刀尖圆弧半径补偿指令加工验证，观察设置刀尖圆弧半径补偿值前、后的切削情况，并进行分析。

3. 多刀加工非标准刀相对偏置的设置与应用

图 4-24 所示为两把刀加工示意图。T0101 为基准刀，用于建立工件坐标系；T0202 为非基准刀，由于刀具安装的随机性，其转到工作位置存在偏置，其相对基准刀的偏置矢量为 T_2，对应的分矢量分别为 T_{2X}和 T_{2Z}。若 01 号偏置存储器的偏置值为零，02 号偏置存储器的外形偏置存储器几何偏置部分分别输入 T_{2X}和 T_{2Z}，则程序执行完 T0202 后，T02 号刀按偏置矢量 T_2 偏移，其结果就相当于 T02 号刀刀位点与 T01 号刀刀位点重合。

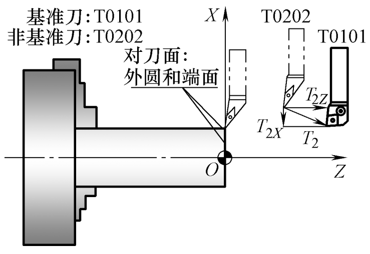


图 4-24　相对偏置输入示意图

（1）非标准刀对刀设置原理与方法　分析图 4-24 可知，偏置矢量 T_{2X}和 T_{2Z}实际上是 T02 号刀相当于 T01 号刀

的相对坐标（又称相对偏置），其可在机上测量并借用［INP. C.］软键输入。操作步骤如下：

1）将01号偏置存储器的几何偏置置零，然后用T01号刀对刀建立工件坐标系。对刀时注意将对刀点处的相对坐标置零。

2）将T02号刀转至工作位置，与T01号刀试切的外圆接触，*Z*轴退刀。

3）进入图4-22所示相对坐标显示方式下外形偏置的操作画面，光标定位至G02号偏置存储器的X偏置值处，按下［INP. C.］软键，则相对偏置矢量T_{2X}被输入。

4）将T02号刀与T01号刀试切的端面接触，*X*轴退刀。

5）将光标定位至G02号偏置存储器的Z偏置值处，按下［INP. C.］软键，则相对偏置矢量T_{2Z}被输入。

注意：不要按画面上显示的相对坐标值用［输入］软键输入，这种方式出错的概率较大。

（2）非标准刀对刀设置验证程序　仍以加工图4-19b所示的轮廓面为例，分别用T0101和T0202加工，加工程序如下：

O4240；	程序名
N10 S300 M03 T0101；	主轴正转，转速为300r/min，调用1号刀及1号刀具补偿
N20 G54 G00 X100. Z160.；	快速定位至起刀点*S*
N30 G90 G00 X52. Z5.；	快速定位至*a*点
N40 G01 Z0 F0.2；	进给移动至*b*点
N50 X0；	车端面至*c*点
N60 Z1.；	*Z*轴退刀*d*点（退刀1mm）
N70 G00 X49.；	快速移动至*e*点
N75 G01 Z-5.；	进给切削外圆至*g*点
N77 U10.；	*X*轴退刀至*h*点
N78 G90 G00 X100. Z160.；	快速退刀至结束点*E*
N79 T0100；	取消1号刀具补偿
N79 T0202；	调用2号刀及2号刀具补偿
N79 G00 X49. Z2.；	快速定位至外圆处距端面2mm位置
N80 G01 Z0；	进给切削至*f*点（注意观察该段程序刀尖位置）
（N85 M01；）	（程序选择性暂停）
N90 Z-5.；	进给切削至*g*点
N100 U10.；	*X*轴退刀至*h*点
N110 G90 G00 X100. Z160.；	快速退刀至结束点*E*
N120 T0200；	取消2号刀具补偿
N130 M30；	程序结束，返回程序头

程序分析：

1）T0101 号刀为标准刀，用 G54 对刀，因此，1 号刀具补偿值必须清零。

2）T0202 号刀为非标准刀，2 号刀具偏置存储器中存入其相对于 1 号标准刀的相对偏置值。

3）两刀具加工表面不变，若对刀准确，2 号刀执行至程序段 N80 后，刀尖应该与工件边缘对齐。为观察方便，可用单段方式执行程序、选择性暂停指令观察对刀是否准确。

4.5.2　数控铣床的偏置显示画面与应用技巧

1. 数控铣削系统偏置画面的进入与操作

（1）偏置画面的进入　偏置画面与操作图解如图 4-25 所示，操作过程如下：

图 4-25　数控铣削系统偏置画面与操作图解

1）按下功能键 OFS/ SET 。

2）按下［偏置］软键，进入刀具偏置显示画面。

3）按下［(操作)］软键，进入偏置参数操作画面，可看到下部的软键发生了变化（注意：若在输入缓冲区键入任何数字或字符也可能自动进入偏置参数编辑画面（取决于参数 No. 3111#7（NPA）的设置)。

（2）偏置显示画面的操作技巧与禁忌　注意数控铣削偏置画面及内容与数控车削偏置画面略有差异，具体如下：

1）外形与磨损偏置集中于一个画面（与数控车削系统略有不同)。

2）偏置内容分刀具半径补偿与刀具长度偏置两项（与数控车削系统略有差异)。

3）操作软键比数控车削系统少一个［测量］软键（与数控车削系统略有差异)。

4）［INP. C. ］软键将刀具当前位置的 Z 轴相对坐标值输入到偏置存储器中，主要用于非标准刀的相对长度的测量与输入（与数控车削系统略有不同)。

2. 数控铣削系统偏置的应用技巧与禁忌

（1）刀具半径补偿的应用分析　数控铣削系统刀具半径补偿的设置与数控车削系统略有不同，其存储的是刀具的半径补偿值，一般用半径设定（若参数 No. 5004#2（ODI）设置为 1 则为直径设定)，设定的值直接控制刀心轨迹偏离编程轨迹的距离，因此其不一定必须等于刀具半径。

注意：刀具半径补偿值的设置只能用［输入］和［＋输入］操作，无车削系统的［测量］软键。

（2）刀具长度偏置的应用　数控铣削系统长度存储器存储的是刀具长度偏置指令调用的补偿值，［INP. C. ］软键可方便地实现非标准刀相对长度的测量与输入。以图 3-71 所示

的非标准刀相对于标准刀长度差的测量为例，其操作步骤如下：

1）手动操纵标准刀 T01 与工件表面上某一指定位置接触（试切工件时必须起动主轴旋转）。

2）按下 POS 键，进入坐标位置画面，按下［相对］软键，进入相对坐标位置画面，按下轴地址 Z，画面上的地址符 Z 闪烁，画面切换至相对坐标设置画面，按下［归零］软键，地址 Z 闪烁停止，同时相对坐标值被置零。

3）再将非标准刀与标准刀对刀的相同位置接触，画面上的相对坐标即为非标准刀 T02 与标准刀的长度差。

4）按下 OFS/SET 键，按下［偏置］软键，进入偏置显示画面，用光标移动键定位光标至 No. 002 的外形（H）处，即 H02 号刀具偏置存储器。

5）在输入缓冲区键入地址 Z，画面切换至偏置设置画面，可看到下部软键发生了变化。

6）按下［INP. C. ］软键完成相对坐标值（即非标准刀的相对长度）的输入。

操作技巧与禁忌：

1）严禁在主轴不转的情况下刀具接触工件对刀。若使用寻边器或高度对刀器等则正好相反。

2）关于试切法中刀具与工件接触指的是刀具在旋转状态下试切工件相应表面。实际中还常见用机油粘贴一小块薄纸在工件上的试切部位，当刀具将纸张刮动后，即可认为刀具与工件接触。

4.5.3 数控机床的 G54 ~ G59 指令与坐标系设置操作技巧

选择工件坐标系指令 G54 ~ G59 要求程序运行前预先将工件坐标系相对于机床参考点的偏置值输入保存，程序中通过相应指令选择调用建立工件坐标系。该指令在数控车削与数控铣削系统中原理相同，这里以数控铣削系统为例，数控车削系统由读者自行思考练习。

（1）工件坐标系偏置画面的进入　工件坐标系偏置画面如图 4-26 所示，操作过程如下：

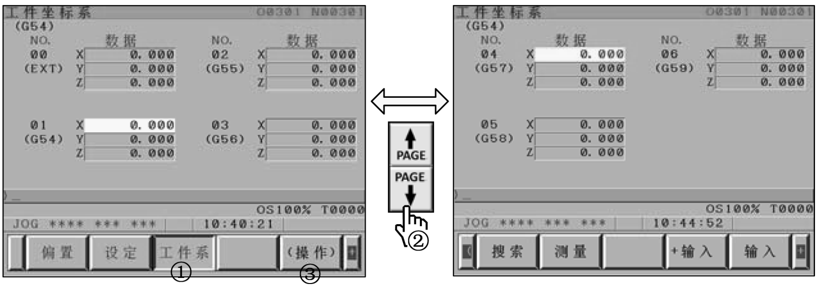


图 4-26　工件坐标系偏置画面

1）按下功能键 OFS/SET，进入偏置设定画面。按下［工件系］软键进入工件坐标系显示画面的第 1 页。

2）按上/下翻页键 PAGE↑/PAGE↓ 可在第 1 页和第 2 页之间进行切换。

3）按［(操作)］软键进入工件坐标系操作画面，利用下部的四个操作软键可进行工件

坐标系的相关设置操作。

（2）工件坐标系偏置画面构成分析

1）各工件坐标系之间关系。图4-26 中 No. 00（EXT）（外部工件零点偏移坐标系）与6 个工件坐标系 No. 01（G54）～No. 06（G59）之间的关系可参见图 3-8a。

2）四个操作软键应用分析。由于工件坐标系主要就集中在这两页中，因此［搜索］软键用得不多；［+输入］和［输入］软键主要用于偏置值的修改；［测量］软键是将刀具当前位置相对于参考点的偏置值与所键入的值相减存入光标所在位置，应用最多。

3）复位键 RESET 与设置值的关系。若参数 No. 1201#7（WZR）设置为 1，则按下复位键 RESET 后 G54 工件坐标系立即生效，即显示画面上的绝对坐标立即显示为 G54 工件坐标系的坐标值。

（3）**工件坐标系偏置设置的操作技巧与禁忌**

1）工件坐标系 No. 01（G54）～No. 06（G59）设置技巧。如图 4-27 所示，假设欲设置工件坐标系为工件右上角，其实质是［测量］软键的应用，目的是要将工件坐标系原点 O_w 相对于机床参考点 O_m 的偏置值输入到工件坐标系 No. 01（G54）存储器中。

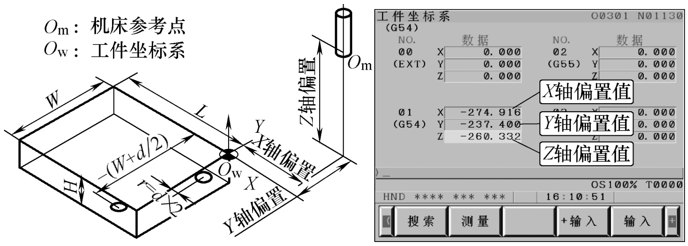


图 4-27　G54 工件坐标系偏置设置示意图

工件坐标系设置操作步骤如下：

① 在 MDI 工作方式下，手动起动主轴旋转。

② 先手动操作，然后手轮操作，试切工件右侧面。

③ 按下功能键 OFS/SET，按下［工件系］→［(操作)］软键，进入工件坐标系操作画面，光标定位至 G54 存储器 X 轴偏置输入文本框处。

④ 在输入缓冲区键入 Xr（r 为刀具半径值 $d/2$），按下［测量］软键，完成 X 轴偏置值输入（假设为图中的 −274. 916）。

⑤ 再次手轮操作试切工件前侧面，光标下移定位至 Y 轴偏置输入文本框处，在输入缓冲区键入 $X-(W+d/2)$（负的刀具半径 $d/2$ 加工件宽度 W 值），按下［测量］软键，完成 Y 轴偏置值输入（假设为图中的 −237. 400）。

⑥ 手轮操作试切工件上表面，光标下移定位至 Z 轴偏置输入文本框处，在输入缓冲区键入 X0，按下［测量］软键，完成 Z 轴偏置值输入（假设为图中的 −260. 332）。

2）**工件坐标系操作技巧与禁忌**

① 试切法对刀必须主轴旋转操作。

② 输入缓冲区对刀键入的值是刀具刀位点在欲设置工件坐标系中的坐标值（含正、负号），因此要注意试切的位置不同，键入的值是不同的。

③ 若工件坐标系欲建立在工件上表面内部（即欲留加工余量），则在第⑥步输入缓冲区中键入 ZΔ（Δ 为加工余量）。

④ 同样可用各种寻边器或高度对刀器对刀。

⑤ 默认情况下返回坐标参考点后 G54 工件坐标系立即生效，因此可以手动操作移动刀具至欲建立工件坐标系原点处，查看显示画面的绝对坐标值，应该基本正确。

3）工件坐标系操作验证程序。以下为 4.4.2 节的 G92 指令验证程序 O4210 修改的 G54 指令验证程序，供参考。刀具轨迹如图 4-28 所示。

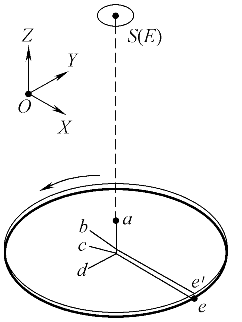


图 4-28　G54 程序刀具轨迹

O4270;	程序名(G54 验证学习程序)
N10 G54 G90 G00 X0 Y0 Z120.;	选择 G54 指令建立工件坐标系,刀具定位至起刀点 S
N20 S300 M03;	主轴正转,转速为 300r/min
N30 G43 G00 Z10. H01;	快速下刀至 a 点(工件上表面 10mm),启动刀具长度偏置
N40 G01 Z1. F50;	进给下刀至 b 点(工件上表面 1mm)
N50 M01;	选择停
/N60 Z-0.5;	进给下刀至 d 点(材料内部 0.5mm)
N70 G42 G01 X30. D01;	横向切削至 e 点,启动刀具半径补偿
N80 G03 I-30.;	逆时针加工整圆返回至 e 点
N90 G40 G01 X0;	返回圆心处 d 点,取消刀具半径补偿
/N100 Z0;	快速提刀至 c 点(与工件表面等高)
N110 G49 G00 X0 Y0 Z120.;	快速返会程序结束点 E,取消刀具长度偏置
N120 M30;	程序结束,返回程序头

程序应用技巧分析：

① 输入程序，装夹毛坯，完成 G54 对刀，清除 1 号刀具半径补偿值与长度补偿值。

② 按下程序段[跳选]和[选择停]按键，按下与释放[单段]按键情况下执行程序。刀具轨迹为：$S \to a \to b \to e' \to$逆时针整圆铣削$\to b \to E$。注意观察暂停点 b 处刀具与工件之间的位置关系，体会程序段跳选符功能与选择性暂停指令 M01 的含义。

③ 确保释放程序段[跳选]和[选择停]按键，按下[单段]按键，单段执行程序。刀具轨迹为：$S \to a \to b \to d \to e \to$逆时针整圆铣削$\to e \to d \to c \to E$。注意程序执行至 b 点时距工件表面的距离是否在 1mm 左右，刀位点是否在工件顶点，执行至 c 点观察是否与工件表面等高。

④ 输入和改变刀具半径补偿值，执行程序，观察刀具半径补偿对刀具轨迹的影响。

⑤ 输入和改变刀具的长度偏置值（为保险起见，仅输入正值），执行程序，观察刀具长度偏置对刀具轨迹的影响。

⑥ 此程序增加了刀具半径补偿与长度偏置指令，因此，程序可练习半径补偿与长度偏置的用法，并可重复执行。

（4）**工件坐标系设置技巧与禁忌**

1）尽可能用［测量］软键设置，不要依据位置画面显示坐标值查询计算，然后用［输入］软键输入。

2）不得随意设置 No.00（EXT）偏置值，因为其同时偏置了 No.01（G54）~ No.06（G59）工件坐标系。

3）可输入正的 Z 轴偏置值提高工件坐标系位置，用于程序空运行。

4）体会改变 Z 轴偏置实现二维轮廓分层粗铣加工。以 3.3.5 节的图 3-87 及其程序 O3670 为例，分别用［+输入］软键输入 -2mm 执行程序 7 次进行加工。

4.6 程序的加工运行与应用技巧

4.6.1 机床的存储器运行与显示画面的观察

1. 存储器运行方式的进入

存储器运行指直接运行预先存储在 CNC 系统存储器中的加工程序。可在自动方式下直接调用运行，也可在编辑方式下检索程序，然后转到自动方式下运行程序，其操作步骤简述如下：

（1）自动方式下运行　操作前确保数控系统中程序的存在，操作步骤如下：

1）按下 自动 方式按键。

2）按下功能键 PROG，默认显示最近一次使用过的程序画面。

3）在输入缓冲区键入程序名 O××××，按下光标移动键 ↓ 或［O 检索］软键，调出待加工程序。

4）按下 循环起动 按键，自动运行启动，程序执行时光标不断滚动，显示正在执行的程序段。程序自动运行结束后自动停止运行，光标返回程序头。

（2）编辑方式下运行　操作步骤如下：

1）按下 编辑 方式按键。

2）按下功能键 PROG，进入程序画面。

3）按下［列表］软键，切换到程序目录画面，查询待运行程序。

4）在输入缓冲区键入程序名 O××××，按下光标移动键 ↓ 或［O 检索］软键，检索出待加工程序。

5）按下 自动 方式按键，进入自动工作方式。

6）按下 循环起动 按键，自动运行启动，效果同上。

（3）操作技巧与禁忌

1）重复执行程序时，可省去程序调用的步骤。

2）程序执行期间，显示画面仍可切换操作，如切换至位置显示画面，或其他存储器运行方式的画面。

3）自动运行期间，可进行主轴速度与进给速度的倍率调节。

4）自动运行期间，可用 循环停止 按键暂停程序的执行；可用复位键 RESET 停止程序

的执行；甚至可用急停按钮停止机床运行（释放急停按钮后必须执行返回参考点操作）。

2. 存储器运行方式显示画面分析

存储器运行方式的显示画面主要有四个——程序、检测、当前和下一步。默认进入检测（程序检查）画面。按下下部相应的切换软键可在各画面之间切换。各画面显示如图 4-29 所示，其中检测画面下部显示的是［绝对］和［相对］软键，上部标题栏提示的是程序检查名称。

图 4-29　自动运行方式下的程序显示画面

显示画面分析：

1）程序执行期间，光标不断滚动，光标所在位置为当前执行的程序段。

2）按下循环起动按键，默认进入的是程序检测画面，可通过下部软键在四种画面之间切换。其中，检测画面可在［绝对］和［相对］坐标显示画面之间切换，按下功能键PROG可切换回程序画面。

3）各程序显示画面内容分析：

① 程序画面：基本画面，显示的程序段较多。

② 程序检测画面：默认进入的画面，其显示有四个程序段，同时显示刀具当前坐标与程序段剩余的待走量、当前的模态指令（最多 12 个）以及刀具、主轴、进给轴等其他信息。

③ 当前程序画面：显示有当前程序段 G 指令及指令值（最多 11 个）、当前模态指令（最多 22 个）以及刀具、主轴、进给轴等其他信息。

④ 下一步程序画面：显示有当前程序段 G 指令及指令值（最多 11 个）和下一程序段 G 指令及数值。

4）各程序画面右上角显示有当前程序号及程序段序号，下部倒数第 2 行为运行状态显示栏。前四项显示信息如下：

① 当前工作方式：MDI：手动数据输入，MDI 运行
MEM：自动运行（存储器运行）
RMT：自动运行（DNC 运行或类似运行）
EDIT：存储程序编辑
HND：手轮进给
JOG：手动连续进给
INC：手动增量进给
REF：手动返回参考点

② 自动运行状态：*****：复位（当电源通电或程序执行结束和自动运行终止时）
STOP：自动运行停止（一段程序执行和自动运行结束时）
HOLD：进给暂停（一段程序的执行被中断和自动运行停止）
STRT：自动运行启动（系统自动运行状态）

③ 轴移动状态/DWELL 状态：MTN：表示轴正在移动
DWL：表示处于停刀状态
*****：其他状态

④ 执行辅助功能的状态：FIN：辅助功能正在执行（等待从 PMC 来的完成信号）
*****：其他状态

4.6.2　系统参数显示、设定与应用技巧

1. 系统参数使用技巧与禁忌

使用系统参数的注意事项：

1）参数的设置在机床出厂之前一般已经设置好了，初学者不要随意修改。但对于学习到一定程度的读者，少量的参数修改是不可避免的。

2）机床出厂时一般提供有一份系统参数设置文件（电子稿或纸质稿），必须认真保管。有条件的用户最好能够对新使用的机床参数等进行备份，必要时可还原至出厂状态。

3）修改参数必须做好记录，以便出现问题时进行判断，必要时还可修改还原。

4）学习与使用系统参数时，必须要有一本原厂的系统参数说明书，能够全面学习与查阅各系统参数的含义与设定值。

5）平时必须禁止初学者单独在机床上随意进行参数的修改，容易造成修改后不能复原的情况。

2. 系统参数显示画面的进入与查询

（1）系统参数显示画面的进入　操作方法如下：

1）按下[手动操作]按键（又称[MDI]方式键），MDI 方式有效（若仅仅是查询参数可省略这一步）。

2）按下功能键[SYSTEM]，默认进入的是系统参数画面（见图 4-30 左图），否则，按下［参数］软键即可，如图 4-30 所示。

3）按软键［(操作)］进入参数设定操作画面，可看到下部软键发生了变化，如图 4-30 右图所示。

（2）系统参数的查询　查询方法有两种：

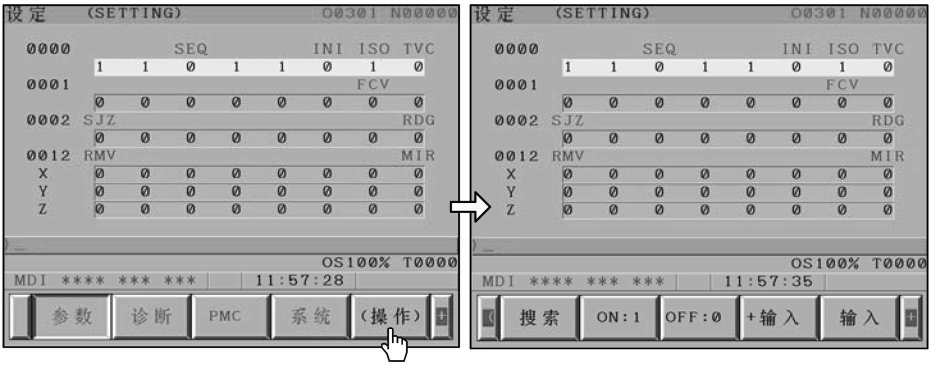


图 4-30 系统参数画面的进入与查询

1）逐页查询。按上/下翻页键PAGE↑/PAGE↓可逐页查询。这种方法查询速度较慢。

2）按参数号查询。在输入缓冲区键入参数号，按［搜索］软键，可快速查询。

注意：由于没有将写入开关允许参数设置为1，所以只能查看，不能修改，适合于查询以及初学者学习参数。

3. 系统参数的设定与修改

（1）参数设定开关的允许/禁止设置　为保护系统参数被误操作，系统设计必须先将参数写入（或称参数写入开关）置1（允许修改）后才能修改参数。显然，设定与修改参数后，必须将参数写入开关置0，恢复到保护状态。操作步骤如下：

1）按下 手动输入 方式按键（又称 MDI 方式键），按键指示灯点亮，MDI 方式有效。

2）按下功能键 OFS/SET ，进入偏置/设定画面。

3）按下［设定］软键进入参数设定画面，如图 4-31 所示。

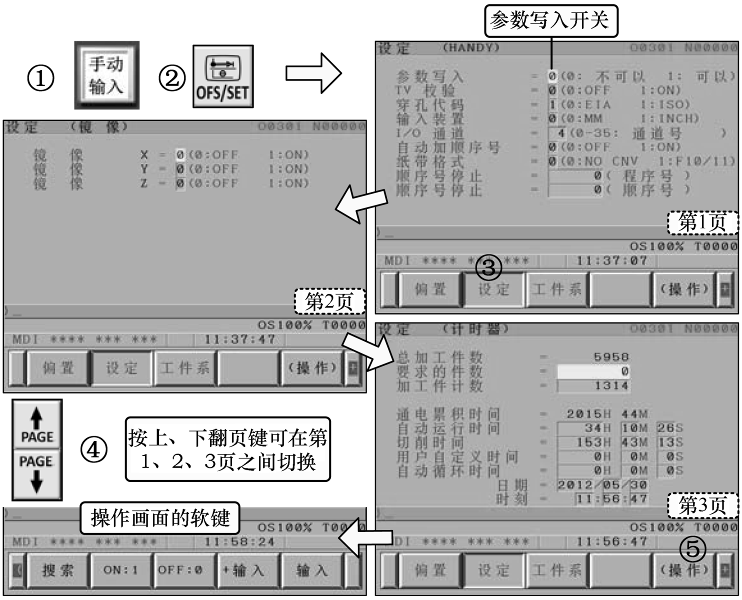


图 4-31 参数设定画面

4）该画面有 3 页，按翻页键PAGE↑/PAGE↓可以在第 1～3 页之间相互切换。

5）按下［（操作）］软键可进入参数操作画面，下部的软键发生了变化。

6）将光标定位至参数写入设置处，按下软键［ON：1］，画面自动跳转至报警画面，显示 100 号报警（允许写入参数），同时画面下部出现闪烁的ALM报警。

7）按下功能键OFS/SET重新返回设定参数画面，可看到参数写入已被置 1。此时下部闪烁的ALM报警一直存在，系统进入参数写入允许状态。

进入参数写入允许状态后，可对系统的参数进行设定和修改。设定完成后，必须执行以下操作恢复参数写入禁止状态。

8）参数设置完成后，按下［（操作）］软键，进入参数设定操作画面，参照第 6）步操作，用软键［OFF：0］将参数写入置 0。

9）按下复位键RESET，闪烁的ALM报警消失，系统重新进入参数写入禁止状态。

参数设定画面使用技巧与禁忌：

1）参数设定画面中的各参数含义参见原厂操作说明书或参考文献［12］。

2）图 4-31 所示设定画面中的各参数对应数控系统各具体的参数（如自动加顺序号参数对应参数 No. 0000#5（SEQ），参见图 4-30。但应注意，图 4-31 所示设定参数画面中的参数设定与修改可直接进行，不需将参数写入开关置 1。

3）闪烁的ALM报警不影响参数的修改，可当成是一种提示，但修改完成后必须恢复修改禁止状态。

（2）**系统参数的设定与修改技巧**

1）系统参数的形式，主要有位型与字节或双字节型。

位型：每个参数由 8 位组成，每个位都有不同的意义，数值为 0 或 1，如图 4-30 所示。

字节型或双字节型：由字（或双字）组成，数值范围随具体参数而有所不同。如参数 No. 3216（自动插入顺序号时号数的增量值），数据形式为“字”型，数值范围为 0～9999。

2）系统参数设定画面的进入。与上一节系统参数画面的进入类似，只是进入之前必须将参数写入允许设置为 1，进入后的画面下部出现闪烁的ALM报警。操作步骤如下：

① 按下手动操作按键（设定系统参数必须在 MDI 方式下进行）。

② 进入设定画面，将参数写入允许设置为 1。画面下部出现闪烁的ALM报警，暂时不理睬它。

③ 按下功能键SYSTEM，默认进入的是系统参数画面，否则，按软键［参数］即可。

④ 按［（操作）］软键，进入参数设定操作画面（在输入缓冲区键入任意值也会自动进入），可以看到下部操作软键的变化，类似于图 4-30 的软键。

3）系统参数的设定技巧。系统参数设定应遵循“先选择，后设定”的原则，不同形式的参数选择方法与操作的按键不同，选择方法如下，选择图例如图 4-32 所示。

① 参数号检索与选择。若已知参数号，可直接在缓冲区键入参数号，然后按［搜索］软键快速选中，光标定位在所选参数的字上。

② 翻页键选择：按上/下翻页键PAGE↑/PAGE↓可顺序逐页翻滚查找，光标定位在最下/上面的字上。

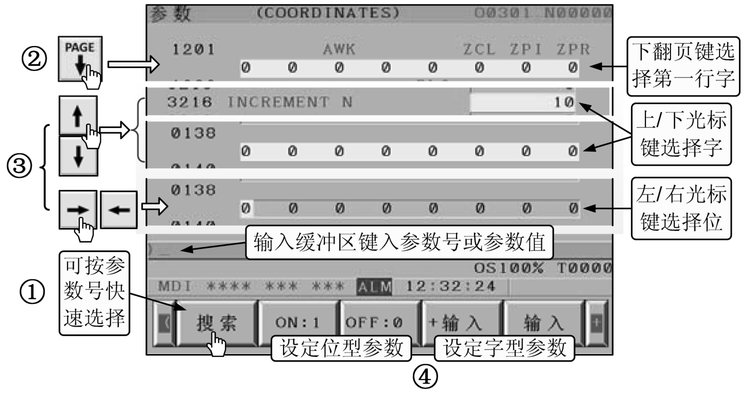


图 4-32 系统参数选择与设定方法

③ 光标移动键选择：按光标移动键↑/↓则可逐个参数查找选择，按光标移动键→/←用于逐位选择定位。

④ 参数的设定主要由操作软键完成，［OFF：1］和［OFF：0］软键可直接设定位型参数。而［+输入］和［输入］软键用于将输入缓冲区键入的字型参数的参数值加输入和输入光标所在位置。

4.6.3 数控程序的传输与应用技巧

数控机床程序的输入，除了基本的键盘输入外，数控系统还提供了 CF 卡插槽和 RS232C 传输接口，可方便地将计算机编写的程序快速准确地传入数控系统。实际加工中，这两种方式应用广泛。数控车削、铣削系统的程序传输基本相同，这里以数控车削系统为例介绍数控程序传输。下一节以数控铣削系统为例介绍 DNC 加工。

1. 程序传输的前期准备

存储卡传输（又称 CF 卡传输）程序与 RS232C 接口传输程序的前期准备条件不同。

存储卡程序传输就是将计算机上的数控程序通过 CF 卡和 PCMCIA 转接卡传送给 CNC 系统。因此，必须准备一张 CF 卡及其 PCMCIA 转接卡，其与机床的接口位于显示器左侧的 CF 卡插槽，另外必须准备一个读卡器，用于 CF 卡与 PC（USB 接口）进行程序与数据的交换，如图 4-33a 所示。

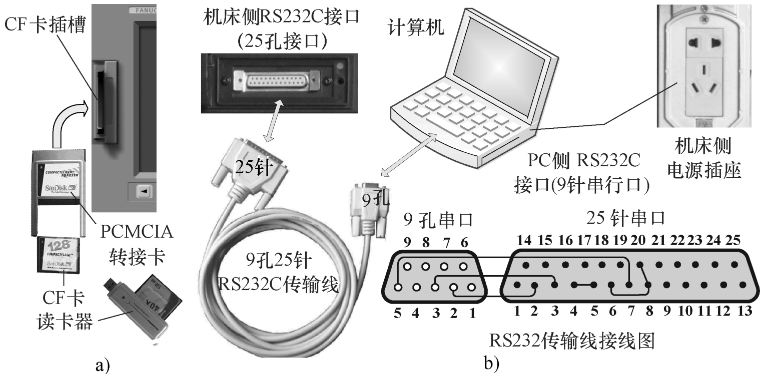


图 4-33 程序传输的硬件条件

a）CF 卡传输 b）RS232C 接口通信传输

RS232C 接口程序传输是指 PC 与数控系统之间基于数据传输线的程序传输，因此，必须准备一根传输线和一台 PC，如图 4-33b 所示。另外，在 PC 侧还必须有一款传输软件，这里以 Mastercam 软件自带的通信功能为例进行介绍。

2. 数控程序传输与通信的参数设置

（1）CF 卡程序传输参数设置　主要是数控系统的设置，必须将 I/O 通道设置为“4”。I/O 通道是由参数 No. 0020 设置，但由于其经常使用，系统将其做到了图 4-31 所示的设定画面中，图 4-34 是 FANUC 0i Mate-TC 系统的设定画面。

（2）RS232C 接口程序传输参数的设定　包括机床侧与 PC 侧参数设置。

1）机床侧参数的设置。要求 I/O 通道设置为“1”，且机床侧与 PC 侧传输软件的传输速率——波特率必须相等，这里假设设置为 4800，其设置步骤为：

① 打开程序锁保护开关。

② 按下功能键 SYSTEM，进入参数设置画面。

③ 按两次继续菜单键▶，找到出现［ALL IO］软键的画面。

④ 按下［ALL IO］软键，出现读入/传出（参数）设置画面，参数设置如图 4-35 所示。

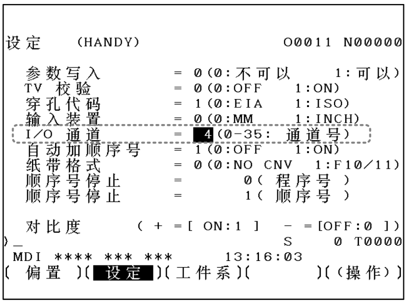


图 4-34　CF 卡传输通道设置

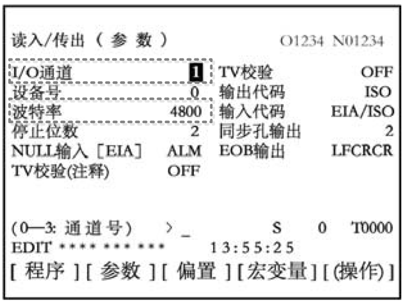


图 4-35　RS232C 机床侧参数设置

2）PC 侧参数的设置。不同的传输软键设置画面有所不同，但设置的参数基本相同，具体如下：

① 数据传输格式：选“ASCII”。

② 端口：其设置应与计算机上的物理端口相对应，如 COM1。

③ 奇偶效验位（同位检查）：FANUC 数控系统只支持 EVEN（偶）或 NONE（无）。

④ 数据位：FANUC 数控系统只支持 7 位。

⑤ 停止位：FANUC 数控系统只支持 2 或 1。

⑥ 传输协议：选择“软件”或“无”。

⑦ 波特率：选择“4800”，其与数控系统侧必须相等。

图 4-36 所示为 Mastercam 软件自带的通信功能设置画面。启动 Mastercam 软件，单击传输按钮 ，即可弹出“传输”对话框，按图 4-36 所示设置。

3. 数控程序的 CF 卡程序传输

（1）CF 卡程序传输操作步骤　传输前，将待传输的程序存入存储卡中，操作中主要画面见图 4-37，操作步骤如下：

图 4-36 PC 侧参数设置

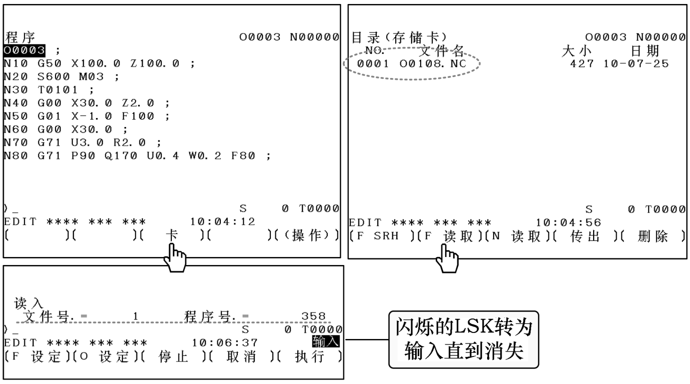


图 4-37 CF 卡程序传输简图

1）打开程序锁保护开关，按下[编辑]和[PROG]键，进入程序画面。

2）按下继续菜单键[▶]，找到具有［卡］软键的画面

3）按下［卡］软键，进入目录（存储卡）程序画面，找到待传输的文件（如图中 0001 O0100），记住程序编号。

4）按下［操作］软键，进入目录（存储卡）操作画面（下部出现［F 读取］等软键）。

5）按下［F 读取］软键，进入传输文件号与程序名设定画面（下部出现［F 设定］软键）。

6）在输入缓冲区键入存储卡上的文件编号（如图中的 0001 号），按下［F 设定］软键，完成读取文件的设定。

7）在输入缓冲区键入新存储的文件名（图中假设为 O0358），可以与卡上的文件不同，但不能与 CNC 系统上现有的文件名重名。按下［O 设定］软键，完成存储程序名的设定。

8）按下［执行］软键，开始程序传输输入。传输时，画面右下角出现短暂的闪烁的“LSK”表示传输准备好，很快转为闪烁的“输入”字样，表示正在传输，传输结束后，闪烁的“输入”字样消失。

9）按功能键[PROG]进入程序画面，可以看到刚传输输入的程序 O0358 为当前程序。

10）按［列表］软键进入程序目录画面，可检索到新传入的程序 O0358。

（2）CF 卡程序传输技巧与禁忌

1）与 MDI 键盘创建程序不同，传输的程序和后续 DNC 加工的程序格式必须完整，即必须包括程序开始和结束符“%”。

2）同创建程序一样，程序传输之前必须将程序锁保护开关打开。

3）尽量做到机床关机状态下插拔 CF 卡，因为插拔瞬间的冲击电流易损坏 CF 卡或系统电路。

4）确保 I/O 通道设置为 4（即 CNC 的 0020 号参数设为 4）。

5）CF 卡插入方向不能出错，且用力要适当，拔出时不要摇晃，否则可能导致插槽断针。

6）CF 卡若要格式化应选 FAT 格式。

4. 数控程序的 RS232C 通信程序传输

（1）RS232C 通信程序传输

1）机床侧参数的设置，包括接好传输线、设置好传输参数等，如图 4-35 所示。

2）数控系统做好接收程序的准备，如确保程序保护开关被打开，其余操作步骤如下：

① 按 编辑 和 PROG 键，进入程序画面，按下［列表］软键，查询系统中现有程序名。

② 按下［操作］软键，按继续菜单键▶，找到有［读入］软键的画面。

③ 键入新程序名（不允许与系统中程序重名），按下［读入］软键，软键发生变化。

④ 按下［执行］软键，画面右下角出现闪烁的“LSK”，表示数控机床侧已经做好了接收程序的准备，如图 4-38 所示。PC 侧开始传送程序时，闪烁的“LSK”转为“输入”字样，闪烁的“输入”字样结束，表示程序接收完毕。

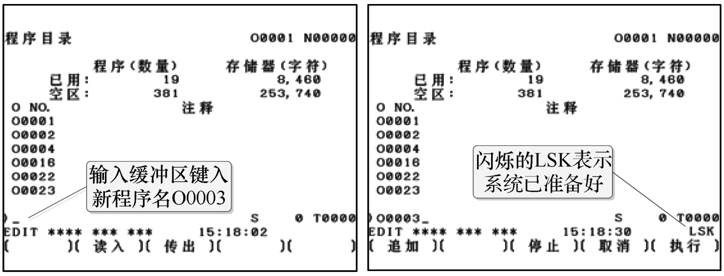


图 4-38　RS232C 程序传输机床侧操作

3）PC 侧发送数控程序。以 Mastercam 自带的传输软件为例，操作步骤如下：

① 启动 Mastercam 软键，单击传输按钮，弹出“传输”对话框，按图 4-36 所示设置传输参数后单击“发送”按钮，弹出“打开”对话框，如图 4-39 所示。

② 查找到所需传输的程序（假设为 O3030），单击“确定”按钮，弹出 DOS 风格的传输画面，开始传输，程序传输期间，画面上可以看到所传输的程序不断翻滚上移。传输完成后，提示单击 <Enter> 键结束。

（2）RS232C 通信程序传输技巧与禁忌

1）程序格式必须完整，即包括程序开始和结束符“%”。

2）RS232C 通信传输程序，PC 侧必须要有合适的传输软件，如 CIMCOEdit、WINPCIN、

图 4-39　RS232C 程序传输 PC 侧操作

NCSentry 和 V24 等，读者可选择适合自己的软件。

3）尽量做到机床关机状态下插接 RS232 传输线，因插拔瞬间的冲击电流，易损坏系统电路。

4）PC 尽可能用机床侧的电源供电，这样可保证数控系统与 PC 等电位，有利于保护系统电路。

5）确保 I/O 通道设置为 1（即 CNC 的 No. 0020 号参数设为 1）。

6）PC 侧开始传送程序时，图 4-38 中闪烁的“LSK”转为“输入”字样，闪烁的“输入”字样结束，表示程序传送/接收完毕。

4.6.4　数控程序的 DNC 加工与应用技巧

前述的程序传输虽然可解决数控程序 MDI 键盘输入“慢与易错”的问题，但由于数控系统的内存较小，无法存储较大的程序，为此，数控系统提供 DNC 功能。此处以数控铣削系统为例介绍 DNC 加工。

DNC（Direct Numerical Control，直接数控，又称在线加工）运行方式是通过通信等方式读入外部设备（PC 或 CF 卡等）上程序的同时执行自动加工（又称 DNC 运行）。

1. CF 卡传输 DNC 加工

CF 卡传输 DNC 加工除了前述的 I/O 通道设置为“4”等要求外，还必须将参数 No. 0138#7（MDN）设置为 1。

（1）CF 卡传输 DNC 加工的操作步骤　图 4-40 所示为 CF 卡传输 DNC 运行操作主要画面，其操作步骤如下：

1）开机后，按下[自动]和[在线加工]（即 DNC）方式按键，其按键指示灯点亮，进入空白的 DNC 程序检查画面，画面左下角的 RMT 显示当前为 DNC 状态。

2）按下 MDI 面板上的[PROG]键，进入 DNC 程序调用画面或程序检查画面，不断按[PROG]键可在程序画面与程序检查画面之间切换，图中显示的是程序画面。

3）按两次继续菜单键▶出现［DNC-CD］软键画面。

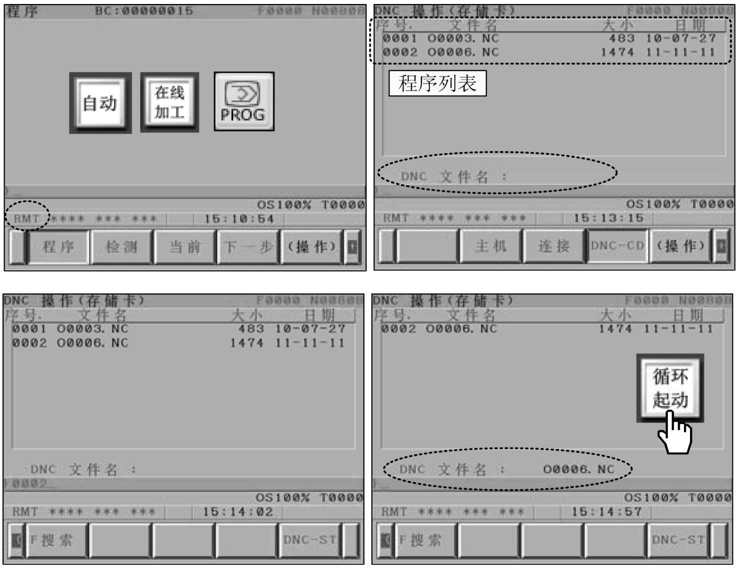


图 4-40　CF 卡 DNC 加工的操作步骤

4）按下［DNC-CD］软键进入 DNC 操作（存储卡）画面，显示出 CF 卡上的程序列表，同时，画面下部出现空白的“DNC 文件名:”提示。

5）在输入缓冲区键入待 DNC 运行的程序的编号，如 O0006 程序的编号 0002（前 0 可省略），这时画面下部软键发生变化，出现了［DNC-ST］软键。

6）按下［DNC-ST］软键完成程序输入，可以看到输入的程序显示在“DNC 文件:”提示后，同时该程序处于程序列表中。

7）按下 循环起动 按钮，系统开始读取 CF 卡上指定程序，进行 DNC 方式程序运行。

（2）CF 卡传输 DNC 加工技巧与禁忌

1）DNC 加工与程序传输一样，程序的头尾必须有程序开始和结束符“%”。

2）DNC 加工前必须检查并完成 I/O 通道和参数 No. 0138#7（MDN）的设置。

3）依据程序的大小，能传输的尽可能不要在线加工。

4）由于 DNC 加工前无法直接浏览程序，因此，开始几个程序段单段执行程序，且将进给倍率调小一点，待确认程序无误后，释放单段按键连续自动地正常执行程序。

5）CF 卡 DNC 加工，无传输线和计算机死机等问题，因此比 RS232C 接口通信的 DNC 加工更加安全、可靠，实际中应用较为广泛。但注意 CF 卡的插/拔要注意方法，防止出现 CF 插槽的断针等问题。

2. RS232C 通信接口程序传输 DNC 加工

RS232C 通信接口程序传输除可进行前述的程序传送外，还可进行 DNC 加工。RS232 通信接口 DNC 加工时，PC 侧必须要有一款通信传输软件，前面曾介绍过用 Mastercam 软件的通信功能进行传输的方法，这里再以 CIMCO Edit 软件为例进行介绍。

（1）RS232C 通信接口程序传输 DNC 加工的操作步骤　如下所述：

1）机床侧参数的设置，参见图 4-35 的介绍，特别注意波特率必须与 PC 侧通信软件设置相同。

2）CIMCO Edit 软件通信参数的设置。RS232C 通信传输程序必须要有通信软件，且必须做好通信参数的设置，此处以 CIMCO Edit 软件为例进行介绍，操作步骤如图 4-41 所示，重点是第 5 步的通信参数设置。

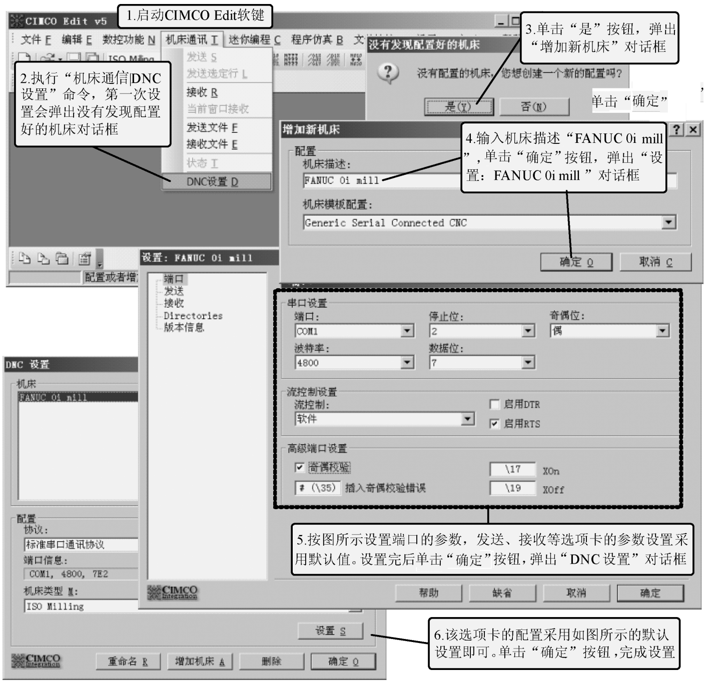


图 4-41　CIMCO Edit 软件通信参数设置图解

3）RS232C 通信接口程序传输 DNC 加工操作步骤如图 4-42所示，具体如下：

① 按下[自动]和[在线加工]方式按键，进入空白的 DNC 程序检查画面，画面左下角的 RMT 显示当前为 DNC 状态。

② 按下[单段]按键，进入单段执行方式。按下[循环起动]按键，右下角出现闪烁的“LSK”，表示系统做好接收程序的准备。

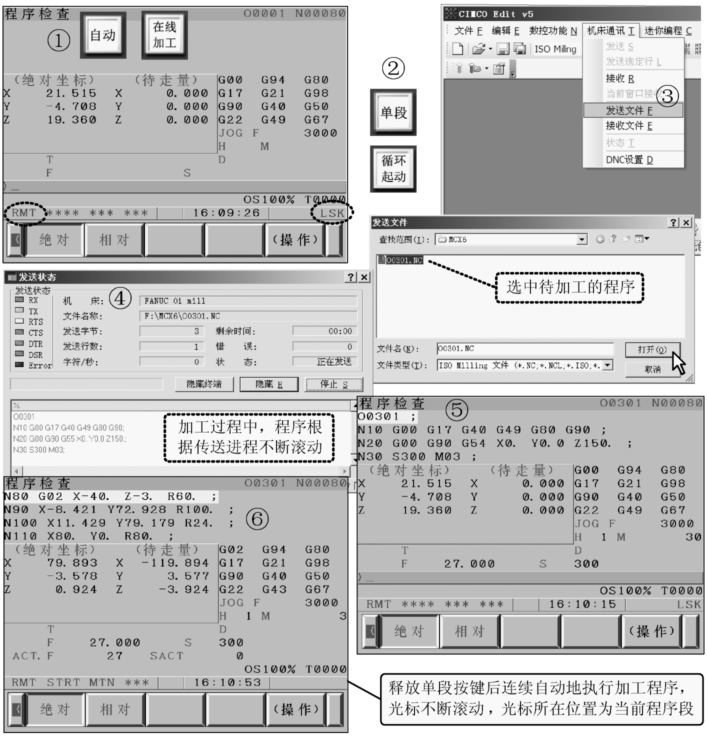


图 4-42　RS232C 通信 DNC 加工操作图解

③ 在 PC 侧开启 CIMCO Edit 软件，执行“机床信信 | 发送文件”命令，弹出发送文件对话框。

④ 查找并选中所需程序文件，单击“打开”按钮，弹出发送状态对话框，PC 开始向数控系统传送程序。同时程序画面可看到程序已传入系统。

⑤ 由于系统设置为单段工作方式，所以光标停留在程序名处。

⑥ 逐步按下循环起动按键，单段执行若干程序段，确认程序无误后，释放单段按键，按下循环起动按键进入连续自动执行状态。

（2）**RS232C 通信接口程序传输 DNC 加工操作技巧与禁忌**

1）数控系统的 I/O 通道必须设置为 1，机床侧通信参数与传输软件侧的参数设置需相同。

2）程序执行初期以单段执行，确认无误后释放单段按键执行程序。

3）PC 侧的发送状态栏实时动态显示程序传送状态，并滚动显示当前程序传送的程序段，还有程序进程条，显示整个程序的执行阶段。

4）CIMCO Edit 软件同样可用于程序传输。

4.6.5　清屏功能与应用技巧

FANUC 0i 系统具有清屏功能。

清屏方式有手动清屏与自动清屏两种方式。当参数 No. 3123 设置为 0 时，只能手动清屏；当参数 No. 3123 设置为非零时，即为自动清屏。手动清屏操作方法如下，操作如图 4-43所示。

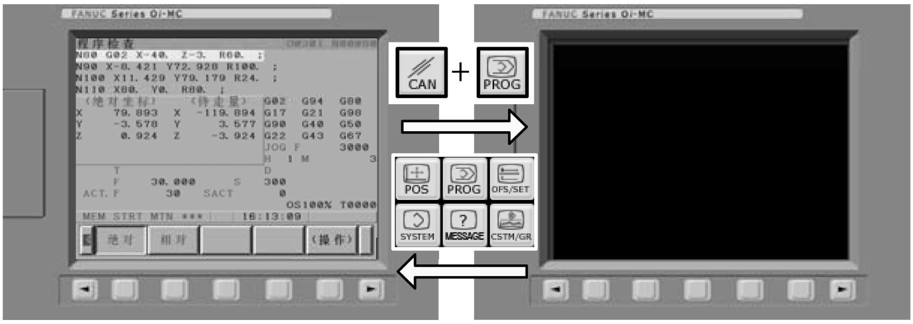


图 4-43　清屏与恢复屏显的方法

手动清屏：按住 CAN 键并按下任一功能键，屏幕关闭。

恢复屏显：按任一功能键（如 PROG），屏幕显示恢复。

清屏功能的应用技巧与禁忌：自动加工时，若加工时间较长等不需要屏幕显示时，可关闭显示单元，以延长其使用寿命。但是，频繁地进行清屏与屏显切换，反而会降低显示器的寿命，因此建议 1h 以上不需要屏幕显示时才使用清屏功能。

4.7　数控系统的帮助功能构成分析与操作应用

4.7.1　帮助系统结构构成分析

1. 帮助系统的进入与退出

帮助系统可在机床操作过程中现场提供适当的帮助。帮助系统的进入与退出步骤如下：

1）按下 MDI 面板上的 HELP 键，显示帮助（初始菜单）画面，如图 4-44 所示。

2）在帮助画面的任何操作画面上，按下 HELP 键或任一功能键可退出帮助画面。

图 4-44　帮助（初始菜单）画面

2. 帮助系统的结构构成分析

图 4-44 所示的帮助（初始菜单）画面相当于一本书的目录，它有 3 章，按下部的 3 个软键可进入相应章节画面。FANUC 0i 系统的帮助系统组织结构与操作图解可用图 4-45 表述。可以看出按下帮助键 HELP 可进入帮助（初始菜单）画面，而按下帮助键 HELP 或任一功能键可退出帮助。

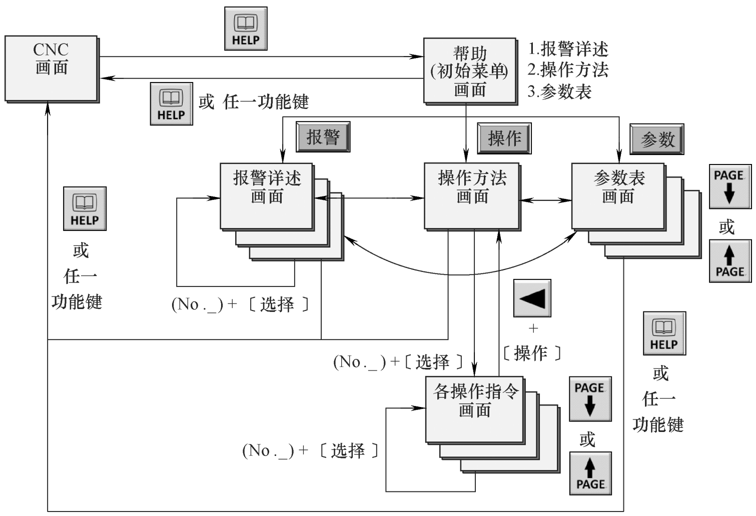


图 4-45　帮助系统的组织结构与操作图解

4.7.2　帮助系统使用的基本操作与注意事项

1. 报警的详细信息查询

（1）当前报警信息显示　当前报警信息指机床操作过程中出现报警提示的状态下通过帮助键 HELP 查询的信息。其操作步骤如下：

1）当画面上出现闪烁的ALM报警提示时，按下帮助键HELP，进入报警（初始菜单）画面。

2）按下［报警］软键，进入报警详述画面，显示当前报警的详细说明，图 4-46 所示为 010 号报警画面示例。

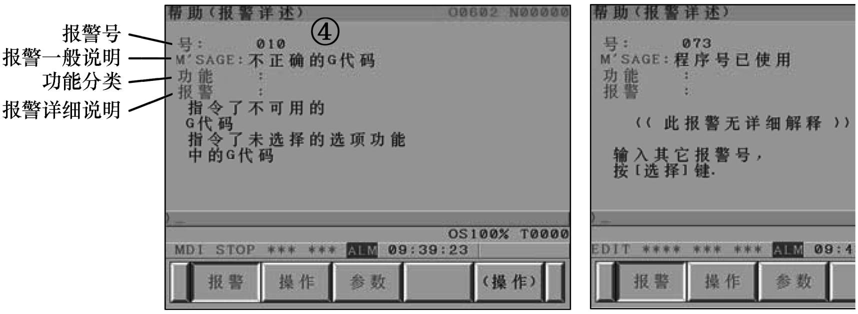


图 4-46　报警显示画面示例

使用技巧与禁忌：

1）详细信息说明仅限于报警号的信息。这些报警实际上还显得简单，注意体会理解。

2）较简单的报警（即报警一般说明已经解释清楚的）可能会出现“此报警无详细解释”提示，如图 4-46 中的 073 号报警。

3）按下复位键RESET，报警信息被清除，显示无报警。

（2）其他报警信息查询　指不出现ALM报警提示的情况下，按报警号查询报警详述。其操作步骤如下：

1）按下帮助键HELP，进入帮助（初始菜单）画面。

2）按下［报警］软键，进入空白的帮助（报警详述）画面。

3）在输入缓冲区键入报警号（数字×××），画面自动切换至操作画面，下部出现［选择］软键，按下［选择］软键，显示×××号报警详述，如图 4-46 中查询的 010 号报警。

4）重复第 3）步，可查询其他报警信息，如图 4-47 所示的帮助（报警详述）画面。

图 4-47　其他报警信息查询

2. 操作方法的查询

操作方法的帮助查询主要介绍了一些常用的操作方法。操作方法查询的操作步骤如下：

1）按下帮助键HELP进入帮助（初始菜单）画面。

2）按下［操作］软键进入帮助（操作方法）画面，可以看到其有序号为1～9的操作方法。

3）键入各序号并按［选择］软键可以进入相应的操作方法（注意：键入序号时下部的操作软键会自动切换至操作画面，出现了［选择］软键）。

每一种操作方法可能有多个页面。每一种操作方法包括操作方法名称、工作方式选择、屏幕显示画面和操作方法四项内容。图4-48中显示的是：删除所有程序、编辑方式中执行、程序画面中显示和输入0～9999并按下删除键DELETE可删除全部程序。

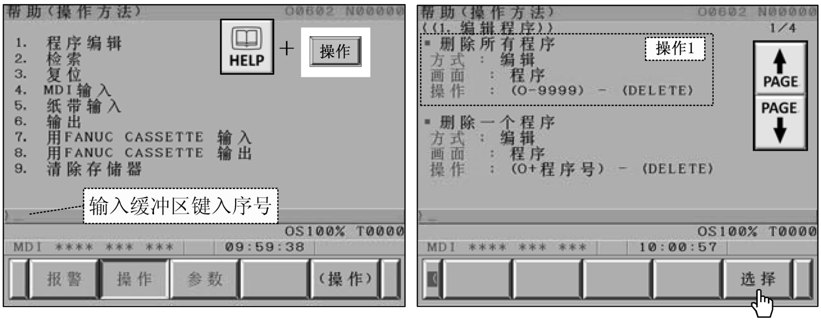


图4-48 操作方式查询示例

4）按翻页键 或 可逐页浏览。

5）按返回菜单键 ，出现［操作］软键。若再按［操作］软键可返回帮助（操作方法）画面。

6）重复第2)～5)步可查询其他操作方法。

注意：操作方法中的操作提示，仅供有一定基础的操作者参考，初学者还是要从较为详细的参考书或官方的操作手册中学习。

3. 参数表查询

数控系统的参数对机床的性能影响很大。参数表的内容繁杂庞大，帮助系统的参数表仅可大致地定位参数的查找范围。参数表的查询步骤如下：

1）按下帮助键HELP进入帮助（初始菜单）画面。

2）按下［参数］软键进入帮助（参数表）画面，如图4-49所示，其内容包括系统功能及参数的范围。

3）按翻页键 或 可翻页浏览。

注意：关于系统参数的详细信息，需查阅相应的参数说明书。

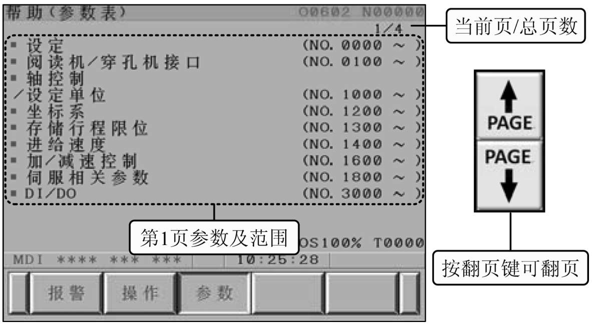


图 4-49　参数表画面（第 1 页）

4. 帮助系统使用时的注意事项

数控系统的帮助系统提供的是数控机床操作的在线帮助。由于需要帮助的内容繁杂，其内容不可能非常详细，简化的内容说明有时难以理解甚至出现部分歧义，因此，初学者不要指望其能够指导您直接学习与操作机床，还是要从基础学起。

参 考 文 献

［1］ 全国有色金属标准技术委员会 . GB/T 2076—2007　切削刀具用可转位刀片型号表示规则［S］. 北京：中国标准出版社，2008.

［2］ 全国刀具标准技术委员会 . GB/T 5343. 1—2007　可转位车刀及刀夹　第 1 部分：型号表示规则［S］. 北京：中国标准出版社，2007.

［3］ 全国刀具标准技术委员会 . GB/T 5343. 2—2007　可转位车刀及刀夹　第 2 部分：可转位车刀型式尺寸和技术条件［S］. 北京：中国标准出版社，2007.

［4］ 全国工业自动化系统与集成标准化技术委员会 . GB/T 19660—2005　工业自动化系统与集成　机床数值控制　坐标系和运动命名［S］. 北京：中国标准出版社，2005.

［5］ 全国工业自动化系统标准化技术委员会 . GB/T 8129—1997　工业自动化系统　机床数值控制　词汇［S］. 北京：中国标准出版社，1997.

［6］ 袁哲俊，刘华明 . 孔加工刀具、铣刀、数控机床用工具系统［M］. 北京：机械工业出版社，2009.

［7］ 北京永定机械厂群钻小组 . 群钻［M］. 上海：上海科学技术出版社，1982.

［8］ 陈为国 . FANUC 0i 数控车削加工编程与操作［M］. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2010.

［9］ 陈为国，陈昊 . FANUC 0i 数控铣削加工编程与操作［M］. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2011.

［10］ 陈为国，陈昊 . 数控车床操作图解［M］. 北京：机械工业出版社，2012.

［11］ 陈为国 . 数控加工编程技术［M］. 北京：机械工业出版社，2012.

［12］ 陈为国，陈为民 . 数控铣床操作图解［M］. 北京：机械工业出版社，2013.

［13］ 陈宏钧，马素敏 . 机械制造工艺技术管理手册［M］. 北京：机械工业出版社，1998.

［14］ 陈日曜 . 金属切削原理［M］. 2 版 . 北京：机械工业出版社，2002.

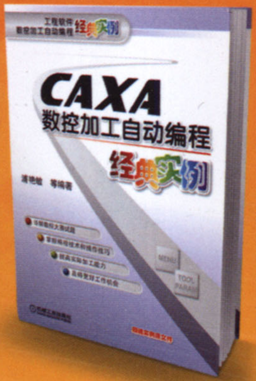
［15］ 邓建新，赵军 . 数控刀具材料选用手册［M］. 北京：机械工业出版社，2005.

［16］ 于久清 . 数控车床/加工中心编程方法、技巧与实例［M］. 北京：机械工业出版社，2009.

［17］ 顾雪燕，等 . 数控加工编程操作技巧与禁忌［M］. 北京：机械工业出版社，2010.

978-7-111-28557-1

978-7-111-40270-1



978-7-111-41161-1

978-7-111-45514-1

978-7-111-36196-1

978-7-111-44408-4

978-7-111-47245-2

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术／机械工程／数控技术

ISBN 978-7-111-47591-0

策划编辑◎周国萍 ／封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-47591-0

9 787111 475910 >

定价：59.00元